

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS**  
Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica



**TESIS DOCTORAL**

**Análisis del comportamiento medioambiental de aceros y  
flúidos de transferencia de calor implicados en centrales  
termosolares con tecnología cilindro-parabólica y  
almacenamiento térmico**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR**

**PRESENTADA POR**

**Esperanza Batuecas Fernández**

**Directores**

**Francisco Javier Pérez Trujillo  
Ricardo Díaz Martín**

**Madrid, 2018**



# UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE MATERIALES E INGENIERÍA  
METALÚRGICA

## TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MEDIOAMBIENTAL DE  
ACEROS Y FLUIDOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR  
IMPLICADOS EN CENTRALES TERMOSOLARES CON  
TECNOLOGÍA CILINDRO-PARABÓLICA Y  
ALMACENAMIENTO TÉRMICO

Presentada por:  
**ESPERANZA BATUECAS FERNÁNDEZ**

Bajo la dirección de:  
**FRANCISCO JAVIER PÉREZ TRUJILLO**  
**RICARDO DÍAZ MARTÍN**

Madrid, 2017



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE MATERIALES E INGENIERÍA  
METALÚRGICA



UNIVERSIDAD  
COMPLUTENSE  
MADRID

## **TESIS DOCTORAL**

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MEDIOAMBIENTAL DE  
ACEROS Y FLUIDOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR  
IMPLICADOS EN CENTRALES TERMOSOLARES CON  
TECNOLOGÍA CILINDRO-PARABÓLICA Y  
ALMACENAMIENTO TÉRMICO

Presentada por:  
**ESPERANZA BATUECAS FERNÁNDEZ**

Bajo la dirección de:  
**FRANCISCO JAVIER PÉREZ TRUJILLO**  
**RICARDO DÍAZ MARTÍN**

Madrid, 2017



*A Justa y Felipe.*



# Agradecimientos

---

Finalizar este trabajo de investigación significa para mí el principio de lo que vendrá. Y quiero agradecer con estas líneas el apoyo prestado por todas las personas que lo han hecho posible.

Al Dr. Ricardo Díaz Martín. Te agradeceré siempre la oportunidad que me diste de formar parte de tu equipo. Gracias Ricardo por descubrirme el ACV, hacerme crecer y permitirme trabajar con la máxima libertad; te ganaste mi lealtad y confianza.

Al Dr. Francisco Javier Pérez Trujillo. Referencia constante en este esfuerzo. Gracias Javier por tu amabilidad, tus enseñanzas y tu tiempo. Asimismo es extensivo el agradecimiento al grupo de Ingeniería de Superficies y Materiales Nano-estructurados.

A Carlos Mayo, por tu inestimable ayuda y tus, siempre, palabras de ánimo.

A mis compañeros de Energías, Héctor Pastor, Juan Francisco Morales y Juan Pablo Fernández, por instruirme en renovables pero más aún por alegrarme las horas compartidas de trabajo. Hicimos un gran equipo colegas.

A Jorge Bañeras y Alberto Requejo. También a Javier de Armentia, Pedro González y Antonio Díaz.

Ha sido un placer trabajar con todos vosotros.

En lo personal se lo agradezco a mi familia, por ser lo primero, y también a la otra familia que eliges; mis amigos. A todos y cada uno. Por escucharme cuando les conté cualquiera de las cosas que me sucedían en este proceso. Os agradezco vuestra infinita paciencia.

Gracias sinceras a todos.

---



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
1.1. Justificación. ....	3
1.2. Objetivo y alcance. ....	7
<b>2. ESTADO DEL ARTE. ....</b>	<b>10</b>
2.1. Introducción. ....	11
2.1. Estudios de ACV realizados en materiales implicados en centrales solares de concentración.....	12
2.2. Materiales implicados en centrales termosolares incluidos en bases de datos de ACV.....	14
2.3. Innovación. ....	14
<b>3. ENERGÍAS RENOVABLES. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA DE CONCENTRACIÓN. CENTRALES SOLARES CILINDRO-PARABÓLICAS..</b>	<b>18</b>
3.1. Uso de energías renovables.....	19
3.1.1. Cambio climático.....	21
3.1.2. Seguridad, dependencia y geopolítica energética.....	33
3.1.3. Acceso a la energía. ....	36
3.2. Situación actual de las energías renovables.....	38
3.2.1. Situación en España.....	42
3.3. Energía solar termoeléctrica. ....	44
3.4. Clasificación de las tecnologías termosolares. ....	47
3.4.1. Torre central. ....	47
3.4.2. Concentración lineal Fresnel. ....	49
3.4.3. Disco parabólico Stirling. ....	49
3.4.4. Centrales Cilindro parabólicas (CCP) .....	51
3.4.5. Generación directa de vapor.....	57

3.4.6. Componentes. ....	60
3.5. Almacenamiento térmico en las centrales termosolares. ....	65
3.5.1. Tecnologías de almacenamiento térmico de energía. ....	67
3.6. Situación actual de la energía solar termoeléctrica. ....	76
<b>4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS. ....</b>	<b>82</b>
4.1. Introducción. ....	83
4.2. Marco de referencia. ....	86
4.3. Definición y exposición de las distintas fases de un ACV según la norma ISO 14040:2006. ....	87
4.3.1. Definición del objetivo y el alcance. ....	87
4.3.2. Análisis de inventario. ....	90
4.3.3. Evaluación de Impacto. ....	93
4.3.4. Interpretación. ....	126
4.4. Herramientas informáticas para el Análisis de Ciclo de Vida. ....	127
4.4.1. SimaPro 8. ....	127
<b>5. MATERIALES A ESTUDIO. ....</b>	<b>131</b>
5.1. Introducción. ....	132
5.2. Acero al carbono A516. ....	133
5.3. Acero T22. ....	134
5.4. Acero inoxidable austenítico AISI 316. ....	135
5.5. Acero P92. ....	136
5.6. Aceite térmico Therminol. ....	137
5.7. Sales fundidas: Sal solar binaria y sal solar Hitec. ....	139
5.7.1. Sal Solar binaria. ....	142
5.7.2. Sal Hitec. ....	144
5.7.3. Procesos de degradación de sales de nitratos alcalinos fundidos. ....	145

5.8.	Avances tecnológicos en el desarrollo de sales fundidas y otros fluidos de transferencia de calor.....	147
5.9.	Materiales de contención frente a fluidos de almacenamiento térmico.....	149
<b>6.</b>	<b>MODELIZACIÓN Y RESULTADOS. ....</b>	<b>153</b>
6.1.	Modelado, para su inclusión en el software Simapro, de los materiales involucrados en el estudio. Inventarios de ciclo de vida. ....	154
6.1.1.	Aceros.....	154
6.1.2.	Fluidos de transferencia de calor. ....	160
6.2.	Evaluación de Impacto de materiales. Procesos unitarios. Método CML. ....	161
6.2.1.	Acero AISI 316. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados. ....	162
6.2.2.	Acero T22. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados. ....	169
6.2.3.	Acero A516. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados. ....	175
6.2.4.	Acero P92. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados. ....	181
6.2.5.	ACV comparativo entre los aceros P92, T22, A516 y AISI316. Método CML.....	187
6.2.6.	Sal solar binaria. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados. ....	192
6.2.7.	Sal solar Hitec. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados. ....	198
6.2.8.	Aceite térmico Therminol. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados. ....	204
6.2.9.	ACV comparativo entre sal solar binaria, sal solar Hitec y aceite térmico Therminol. Método CML. ....	209
6.3.	Evaluación de Impacto de materiales. Procesos unitarios. Huella hídrica. ...	213
6.3.1.	Huella hídrica de los aceros.....	213

6.3.2.	Huella hídrica de los fluidos de transferencia de calor/almacenamiento térmico. ....	214
6.4.	Descripción del software System Advisor Model (SAM). ....	216
6.5.	Modelado de las plantas termosolares cilindro parabólicas. Construcción del Inventario de Ciclo de Vida. ....	217
6.5.1.	Localización. ....	218
6.5.2.	Central termosolar de 50 MW. Características. ....	219
6.5.3.	Central termosolar de 150 MW. Características. ....	236
6.5.4.	Inventario de Ciclo de Vida para 50 MW y 150 MW. ....	248
6.6.	Resultados para el modelo de 50 MW. ....	250
6.6.1.	Sistema directo o sistema indirecto. ....	258
6.6.2.	Análisis de las partes consideradas. ....	259
6.6.3.	Resultados detallados para la propuesta más favorable y menos favorable en materia de sostenibilidad. ....	262
6.7.	Resultados para el modelo de 150 MW. ....	265
6.8.	Análisis de la relación potencia instalada-impacto medioambiental. .	270
6.9.	Evaluación de aspectos económicos. ....	272
6.9.1.	Aceros. ....	274
6.9.2.	Fluidos de transferencia de calor. ....	275
6.9.3.	Centrales. ....	277
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES. ....</b>	<b>282</b>
<b>8.</b>	<b>SUMMARY. ....</b>	<b>287</b>
<b>9.</b>	<b>RESUMEN. ....</b>	<b>290</b>
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA CITADA. ....</b>	<b>293</b>

# CAPÍTULO I

# **1.INTRODUCCIÓN.**

## 1.1. Justificación.

En la tecnología de concentración solar, las primeras instalaciones comerciales con producción de energía eléctrica datan de 1984<sup>1</sup>, fueron las centrales SEGS (Solar Energy Generation System, por sus siglas en inglés) en Estados Unidos y se construyeron hasta 1990<sup>2</sup>. Posteriormente se produjo un salto temporal en la aparición de nuevos desarrollos. Desde 1991 hasta 2006 no se construyó ninguna central con esta tecnología. A partir de entonces la mayor expansión se originó en España, desde el lanzamiento de la PS10 en 2007, en Sevilla<sup>3</sup>.

A su vez, de las diferentes tipologías de centrales termosolares que existen, los sistemas de colectores cilindro-parabólicos son actualmente los más desarrollados e implantados a nivel mundial. Constituyen más del 80%<sup>4</sup> de las plantas bajo funcionamiento y construcción. Es por ello por lo que se selecciona para el desarrollo de esta tesis esta tipología.

Al ser la energía termosolar una disciplina en plena expansión, tras el auge inicial en el desarrollo de la técnica, llegaron los problemas ocasionados después de su puesta en marcha; fundamentalmente, en los materiales de contención de los medios de almacenamiento térmico.

El almacenamiento térmico de energía resuelve el desajuste de tiempo entre la producción y la demanda. Lo cual se considera una ventaja frente a otros desarrollos renovables y es por ello que hoy en día las plantas termosolares lo incorporan sistemáticamente, pero la selección de materiales de los primeros proyectos se realizó en base a tecnologías convencionales en las que se conocían los materiales que daban buenos resultados en ellas pero no en esta nueva tecnología; obviando las características

---

<sup>1</sup> *Concentrating Solar Power Projects - Solar Electric Generating Station I Concentrating Solar Power NREL.* (2009). *Nrel.gov*. Accedido el 23 de mayo 2016, desde [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=28](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=28)

<sup>2</sup> *Concentrating Solar Power Projects - Solar Electric Generating Station IX Concentrating Solar Power NREL.* (2009). *Nrel.gov*. Accedido el 23 de mayo 2016, desde [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=36](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=36)

<sup>3</sup> *Concentrating Solar Power Projects - Planta Solar 10 Concentrating Solar Power NREL.* (2015). *Nrel.gov*. Accedido el 23 de mayo 2016, desde [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=38](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=38)

<sup>4</sup> Liu, M., Tay, N. S., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., & Bruno, F. (2016). *Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1411-1432.

propias de la energía termosolar en sí misma. Se colocaron aceros al carbono<sup>5,6</sup> y uno de los principales problemas que surgió fue la formación de procesos corrosivos en los aceros que se encontraban en los tanques en contacto con las sales fundidas, que conformaban el medio de almacenamiento térmico de energía. Estos fallos dieron lugar a la implantación de aceros inoxidable en las partes que soportan temperaturas superiores, como pueden ser los tanques de almacenamiento de sales calientes. Si bien es cierto que los aceros inoxidable presentan una buena resistencia al medio, implican un sobre coste en la instalación que es poco deseable en una tecnología que se encuentra en etapa de reducir el coste de su kWh<sup>7</sup> para poder ser más competitiva en el mix energético.

Del mismo modo, la tipología de cilindros parabólicos presenta un desafío técnico. En estos sistemas el fluido caloportador (suele ser aceite sintético), es diferente del fluido de almacenamiento térmico (normalmente sales fundidas). El aceite sintético presenta un techo tecnológico por estar restringido a unos máximos de temperatura en torno a los 390°C<sup>8</sup>, lo que limita los ciclos de potencia a rendimientos inferiores a los que se conseguirían si se tuvieran temperaturas más elevadas. Además, es menos económico que las sales fundidas<sup>9</sup>.

Las sales fundidas pueden alcanzar temperaturas en torno a los 600 °C<sup>10</sup>, dependiendo de la composición de estas. Esto supone que se esté estudiando la viabilidad de sistemas directos que eliminen el aceite y hagan de las sales un mismo fluido de almacenamiento y transferencia de calor. Para ello, es fundamental desarrollar materiales que soporten altas temperaturas sin degradarse significativamente en esos medios.

<sup>5</sup> Tortorelli, P. F., Bishop, P. S., & DiStefano, J. R. (1989). *Selection of corrosion-resistant materials for use in molten nitrate salts* (No. ORNL/TM-11162). Oak Ridge National Lab., TN (USA).

<sup>6</sup> Bradshaw, R. W., & Clift, W. M. (2010). *Effect of chloride content of molten nitrate salt on corrosion of A516 carbon steel*. Sandia report.

<sup>7</sup> Hernández-Moro, J., & Martínez-Duart, J. M. (2012). *CSP electricity cost evolution and grid parities based on the IEA roadmaps*. Energy policy, 41, 184-192.

<sup>8</sup> Grogan, D. C. (2013). *Development of Molten-Salt Heat Transfer Fluid Technology for Parabolic Trough Solar Power Plants-Public Final Technical Report* (No. DOE/08GO18038). Abengoa Solar, LLC.

<sup>9</sup> Cable, R., Blake, K. O. C. D., NREL, H. P., & Potrovitza, N. (2003) *Overview on use of a Molten Salt HTF in a Trough Solar Field*.

<sup>10</sup> Medrano, M., Gil, A., Martorell, I., Potau, X., & Cabeza, L. F. (2010). *State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 56-72.



En el entorno de estos nuevos desarrollos tecnológicos, lo que se aporta con este trabajo de investigación es introducir una variable más para la selección de materiales; para que no solo se desarrollen y seleccionen en base a criterios puramente mecánicos sino también medioambientales.

La creciente concienciación con el medio ambiente hace cada vez más necesarias herramientas para la industria con el fin de mejorar su ecoeficiencia. Y una de las herramientas más potentes para ello es el Análisis de Ciclo de Vida.

El papel de la industria en el cumplimiento del desarrollo sostenible de nuestras sociedades está siendo discutido, y existen estudios que concluyen que la industria debe incluir una justificación medioambiental del producto y de la propia empresa en una perspectiva de Análisis de Ciclo de Vida para llegar a ser sostenible<sup>11</sup>.

La revisión bibliográfica indica que este tipo de estudios no se encuentran realizados. Existen estudios sobre Análisis de Ciclo de Vida en centrales termosolares pero no llegan a profundizar en los componentes exactos de los materiales implicados sino que lo utilizan como una herramienta para conocer si la termosolar es más o menos respetuosa que otras tecnologías como puede ser el gas natural u otras renovables.

Existen estudios que realizan Análisis de Ciclo de Vida para tecnologías renovables con el fin de compararlas entre ellas e incluso con las convencionales. Algunos ni siquiera introducen la energía solar térmica de concentración en sus comparativas<sup>12</sup>, y otros que sí la incluyen arrojan resultados que, hoy día, no son significativos por obsoletos<sup>13,14</sup>, ya que, como se ha comentado anteriormente, hasta 2007 tan solo existían las plantas SEGS y se acababa de producir el parón tecnológico.

Los que afinan más, realizan estudios en base a materiales genéricos, se encuentran partidas del tipo “acero” en sus inventarios, sin definir las composiciones exactas de los mismos e igualmente es realizado para ver los beneficios de la energía termosolar frente

---

<sup>11</sup> Hauschild, M., Jeswiet, J., & Alting, L. (2005). *From life cycle assessment to sustainable production: status and perspectives*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 54(2), 1-21.

<sup>12</sup> Góralczyk, M. (2003). *Life-cycle assessment in the renewable energy sector*. Applied Energy, 75(3), 205-211.

<sup>13</sup> Weinrebe, G., Boehnke, M., & Trieb, F. (1998). *Life cycle assessment of an 80 MW SEGS plant and a 30 MW Phoebus power tower*. Solar Engineering, 417-424.

<sup>14</sup> Bhat, I. K., & Prakash, R. (2008). *LCA of renewable energy for electricity generation systems—a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(5), 1067-1073.

a otras tecnologías<sup>15</sup>. También los hay focalizados en aspectos económicos de parte de las plantas<sup>16</sup> o para ver el tiempo de retorno energético de las mismas<sup>17</sup>. Por lo tanto, efectivamente existen Análisis de Ciclo de Vida en el entorno de la tecnología solar de concentración, pero en ningún caso con el propósito de una mejora en la selección de materiales ni con un estudio pormenorizado de los impactos que causan cada uno de los componentes de los mismos.

Por todo lo anterior, lo que se realizará en este trabajo será un estudio del comportamiento medioambiental de los materiales implicados en la contención de fluidos de almacenamiento térmico, así como de los propios fluidos en sí mismos. Se estudiarán aceros al carbono y aceros inoxidable, así como los medios con los que se encuentran en contacto, que son sales fundidas y aceite térmico. Cuantificar sus impactos sirve para caracterizarlos y poder seleccionarlos acorde a criterios de sostenibilidad. Todo ello se enmarca en Análisis de Ciclo de Vida completos para cada material y para el conjunto de ellos en el seno de una central de 50MW y otra de 150MW.

---

<sup>15</sup> Piemonte, V., De Falco, M., Tarquini, P., & Giaconia, A. (2011). *Life cycle assessment of a high temperature molten salt concentrated solar power plant*. Solar Energy, 85(5), 1101-1108.

<sup>16</sup> Laing, D., Steinmann, W. D., Viebahn, P., Gräter, F., & Bahl, C. (2010). *Economic analysis and life cycle assessment of concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants*. Journal of Solar Energy Engineering, 132(4), 041013.

<sup>17</sup> Lechón, Y., de la Ría, C., & Sáez, R. (2008). *Life cycle environmental impacts of electricity production by solarthermal power plants in Spain*. Journal of Solar Energy Engineering, 130(2), 021012.

## **1.2. Objetivo y alcance.**

El objetivo de esta investigación se centra en cuantificar los impactos ambientales tanto de los propios materiales que se encuentran en contacto con fluidos de almacenamiento y/o transferencia de calor, así como de estos mismos utilizados en centrales termosolares de concentración con tecnología cilindro-parabólica. Los materiales de contención de dichos fluidos son aceros con características propias en función de su aplicación. Aceros al carbono para aplicaciones con temperaturas inferiores y aceros inoxidables en aquellas zonas en las que se alcancen temperaturas superiores. Los fluidos de transferencia de calor estudiados serán sales fundidas y aceite sintético. Como fluidos de almacenamiento térmico se estudiarán sales fundidas.

Mediante un análisis pormenorizado de sus capacidades, se cuantificará el potencial de agotamiento abiótico, la acidificación, la eutrofización, la formación de oxidación fotoquímica, el agotamiento de la capa de ozono, la toxicidad humana, la ecotoxicidad terrestre, el cambio climático (también conocido como huella de carbono) y la huella hídrica haciendo uso de los métodos CML-IA y Boulay et al., con la herramienta Análisis de Ciclo de Vida como marco principal de la presente tesis doctoral.

Se cuantificarán los impactos anteriormente citados de procesos unitarios de cuatro aceros, un aceite térmico y dos sales fundidas. Con esta cuantificación se determinará qué procesos y qué componentes de cada material son los causantes de uno u otro impacto, a la vez que se determinará cuál de los impactos supone unas consecuencias más agravantes para el deterioro del medio ambiente.

El estudio de los procesos unitarios, en Análisis de Ciclo de Vida completos, servirá para realizar una propuesta de selección de materiales basada en criterios de sostenibilidad medioambiental.

Uno de los objetivos que persigue esta tesis es incorporar la variable medioambiental en el conjunto de todas aquellas que sirven como selección de un material en una u otra aplicación industrial.

A sabiendas de que fisicoquímicamente los aceros y los fluidos seleccionados para su estudio cumplen con los requisitos de resistencia mecánica, térmica, corrosiva, etc., suficientes y necesarios para formar parte de una central termosolar con tecnología

cilindro-parabólica, se aportará una visión sobre cuál de ellos impacta de manera menos perjudicial en el medio ambiente, entendiendo ello como una confluencia de daños a la salud humana, agotamiento de los recursos y daños a los ecosistemas.

Tras conocer la problemática medioambiental de los materiales vistos como procesos unitarios, se desarrollará un inventario en el que se cuantificarán las cantidades de estos materiales implicados en dos centrales termosolares de potencias diferentes, una de 50 MW y otra de 150 MW. Se cuantificarán, entonces, los impactos medioambientales que supone el uso de aceros, aceite y sales fundidas en el entorno de dos centrales reales de potencias diferentes. El objetivo de esta parte es conocer cómo afecta el crecimiento de potencia en una central con sus impactos medioambientales.

Completando el estudio, se aportará una evaluación económica. En ella se mostrarán órdenes de magnitud con el objetivo de conocer la relación ecológica-económica de los materiales utilizados. Relación destacada en el ámbito del desarrollo sostenible.

El alcance de esta tesis está centrado en todo momento en un análisis de los fluidos de almacenamiento térmico y transferencia de calor en contacto con los aceros que los contienen. Quedan fuera del estudio otro tipo de materiales que conforman las plantas termosolares. Ello viene motivado por el hecho de que estos contactos sal-acero es donde se producen procesos corrosivos a mejorar, no solo desde el punto de vista estrictamente de resistencia estructural sino en base a criterios sostenibles.

El alcance de los Análisis de Ciclo de Vida se definirá en profundidad en sus apartados correspondientes, igualmente, se indica que serán en todo momento análisis desde la extracción de materias primas hasta su procesado. En ningún caso se analizan etapas de uso y fin de vida.

# CAPÍTULO II

## **2. ESTADO DEL ARTE.**

## 2.1. Introducción.

Es difícil determinar cuál fue el primer estudio de ACV; Según Vigon et al.<sup>18</sup>, uno de los primeros ACV fue realizado por Harold Smith, gerente general del proyecto de la Central de Generación Nuclear de Douglas Point, en Canadá. En 1963, en la Conferencia Mundial de la Energía, Smith informó del cálculo de las necesidades energéticas para la producción de productos químicos. Sus próximos estudios apuntaron a optimizar el consumo de energía. A esto le siguió una transición, de los estudios de consumo energético hacia estudios que tuvieron en cuenta, además, el consumo de materias primas, materializados en dos informes<sup>19,20</sup>. Por primera vez, se tuvo en cuenta todo el ciclo de vida del producto en un estudio realizado para Coca-Cola sobre el uso de botellas de plástico frente a vidrio para el embalaje. Contrariamente a todas las expectativas, el estudio reveló que las botellas de plástico eran menos contaminantes que las botellas de vidrio<sup>21</sup>. Los resultados completos del estudio nunca fueron publicados y los resultados parciales plantearon discusiones sobre la validez de las comparaciones y llevaron a la comunidad científica a pensar en un proceso de normalización. Como resultado de aquello se constituye la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC, por sus siglas en inglés); Pero tardó casi 20 años en aparecer la primera estandarización en ACV. Hoy en día está estandarizado a través de la serie de normas ISO 14040<sup>22</sup>.

La recopilación de las entradas y salidas de cualquier producto o proceso y su evaluación mediante herramientas tan potentes como el Análisis de Ciclo de Vida arrojan que las energías limpias no son tan limpias si los procesos y productos implicados en ellas no lo son. Es decir, producir 1kWh con tecnología termosolar no puede verse como algo aislado. La no combustión de combustibles fósiles no libra a una instalación de cargas medioambientales. El simple hecho de analizar el material que se coloca en un punto de una instalación, como puede ser cualquiera de los aceros estudiados en este trabajo de investigación, lleva a estudiar los procesos aguas arriba del

<sup>18</sup> Vigon, B. W., & Harrison, C. L. (1993). *Life-cycle assessment: Inventory guidelines and principles*.

<sup>19</sup> Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The limits to growth*. New York, 102.

<sup>20</sup> Goldsmith, E. (1974). *Blueprint for survival*. Signet.

<sup>21</sup> Hunt, R., Franklin, W. (1996). *LCA -How it came about. Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA*. International Journal of Life Cycle Assessment 1(1): 4-7.

<sup>22</sup> ISO, E. (2006). 14040: 2006. *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*.

mismo y estos son la extracción de materias primas, su transporte, su procesado en hornos, etc. Con que algunos de estos procesos tenga una carga medioambiental, la arrastrará en toda la cadena productiva, incrementando la misma. Con todo ello, lo que se aprecia es la complejidad de cada elemento en el momento que se comienza a analizar todo lo que lleva aguas arriba del mismo.

Cabe destacar además la importancia de obtener ACVs completos examinando varios indicadores a la vez. El riesgo de realizar ACVs de un único indicador es que se pueden tener resultados favorables en esa categoría que se está estudiando y obviando las demás, puede resultar no certero. Por ello, la opción más completa es realizar ACVs con diversas categorías de impacto, así es como se ha realizado en este trabajo de investigación.

A continuación se procede a realizar una revisión bibliográfica sobre los estudios de ACV existentes en el ámbito de la energía termosolar.

## **2.1. Estudios de ACV realizados en materiales implicados en centrales solares de concentración.**

Existen varios estudios en el ámbito del ACV en energía termosolar. España es un país pionero en energía solar térmica de concentración, así pues, existen estudios que realizaron ACV en este campo. Existe un destacado estudio<sup>23</sup> que publica el inventario de varias centrales térmicas españolas. Además, realiza análisis económicos y presenta hipótesis sobre escenarios de emisiones. Posteriormente, basados en los inventarios de Viebahn et al, se realizaron evaluaciones del impacto ambiental de la electricidad producida en una central solar de 17 MW con torre central y una central solar de 50 MW con tecnología de cilindros parabólicos<sup>24</sup>, para mejorar los sistemas. Lo que en estos estudios se analiza, tal y como se ha indicado, es la producción de electricidad con centrales termosolares, en ningún caso la idoneidad de colocar un acero u otro en las conducciones y tanques del sistema o la selección de una sal u otra para el

---

<sup>23</sup> Viebahn, P., Kronshage, S., & Lechon, Y. (2008). *Deliverable n 12.2-RS Ia. Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants*. New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS) Integrated Project, EU 6th Framework Programme, Brussels.

<sup>24</sup> Lechón, Y., de la Rúa, C., & Sáez, R. (2008). *Life cycle environmental impacts of electricity production by solarthermal power plants in Spain*. Journal of Solar Energy Engineering, 130(2), 021012.



almacenamiento térmico. No diferencian posibilidades en la elección de materiales ni son ACVs comparativos.

Un estudio posterior<sup>25</sup> usando la técnica de ACV, estima que durante su ciclo de vida, una planta cilindro parabólica de referencia de 103 MW emite 26 g de CO<sub>2</sub>eq/kWh producido, consume 4,7 l de agua/kWh producido y demanda de 0,40 MJeq de energía / kWh producido, resultando en un tiempo de recuperación energético de aproximadamente 1 año.

Los materiales implicados en una central termosolar, son evaluados en el informe de Pihl et al.<sup>26</sup> donde, basándose en ACVs precedentes, se aporta una evaluación de las posibles restricciones de materiales para una aplicación a gran escala de la tecnología CSP utilizando datos de una planta de cilindro parabólico ya existente y una planta de torre central. Calculan las necesidades materiales de estos dos diseños de centrales. Todo ello en un modo genérico sin entrar a determinar qué tipo de acero, qué tipo de sal fundida o qué fluido de transferencia de calor es más adecuado en cada caso.

Un reciente estudio sobre ACV en centrales termosolares de concentración<sup>27</sup>, realiza un ACV a la planta termosolar seleccionada dada. No se trata de un análisis de diversos materiales sino una exposición de los impactos que implica. Se realiza bajo el método Ecoindicator 99, que se considera obsoleto y ya ha sido mejorado por el método Recipe. Dicho estudio está centrado en un análisis exergético, es decir, obtiene conclusiones entre la energía consumida por las partes y la producida por la planta. Estudio muy en consonancia con lo analizado por Burkhardt y visto anteriormente.

La revisión bibliográfica indica que se ha analizado la producción de acero para diversas industrias como, por ejemplo, la naval<sup>28</sup> sin detallar el acero exacto analizado sino más centrado en los procesos de reciclaje del mismo. Así pues, no existen Análisis de Ciclo de Vida de los aceros seleccionados en este trabajo de investigación. Sucede

---

<sup>25</sup> Burkhardt, J. J., Heath, G. A., & Turchi, C. S. (2011). *Life cycle assessment of a parabolic trough concentrating solar power plant and the impacts of key design alternatives*. Environmental science & technology, 45(6), 2457-2464.

<sup>26</sup> Pihl, E., Kushnir, D., Sandén, B., & Johnsson, F. (2012). *Material constraints for concentrating solar thermal power*. Energy, 44(1), 944-954.

<sup>27</sup> Ehtiwesh, I. A., Coelho, M. C., & Sousa, A. C. (2016). *Exergetic and environmental life cycle assessment analysis of concentrated solar power plants*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56, 145-155.

<sup>28</sup> Rahman, S. M., Handler, R. M., & Mayer, A. L. (2016). *Life cycle assessment of steel in the ship recycling industry in Bangladesh*. Journal of Cleaner Production, 135, 963-971.

del mismo modo con las sales solares. Igualmente no se encuentra realizado un ACV al aceite térmico Therminol. No se han evaluado ninguno de estos materiales desde un punto de vista medioambiental. Del mismo modo, al no existir ACV de procesos individuales, tampoco aparecen comparativas ni entre sales solares, ni entre aceros como las que se realizan en esta tesis doctoral.

## **2.2. Materiales implicados en centrales termosolares incluidos en bases de datos de ACV.**

Para la realización de un ACV, a día de hoy, existen numerosas bases de datos, siendo una de las más reconocidas por la comunidad científica Ecoinvent<sup>29</sup>. En ella se pueden encontrar actualmente en su versión 3, que es la más actual hasta la fecha y la utilizada en este trabajo de investigación, varios modelos de aceros. En definitiva existen aceros no aleados, acereros bajo aleados y aceros inoxidables, es decir, no existe distinción exacta para diferentes tipos de acero como son los analizados en esta tesis doctoral, P92, AISI316, A516 y T22. Así pues, si se precisa el uso de ellos, se deben modelar para conocer las influencias sobre el medio ambiente que ellos suponen.

Del mismo modo, examinando Ecoinvent 3, se aprecia que la base de datos no dispone de aceites térmicos, ni tampoco de sales fundidas. Todo ello se debe modelar desde cero para poder conocer los impactos asociados a estos materiales.

## **2.3. Innovación.**

El principal aporte que se produce con esta tesis es la caracterización de materiales que forman parte de centrales termosolares cilindro-parabólicas, desde un punto de vista medioambiental.

Las bases de datos más reconocidas no disponen de aceros específicos. A lo máximo que llegan es a hacer una distinción entre aceros al carbono o inoxidables. En esta tesis se va a ver cómo las diferentes composiciones de un acero pueden hacer variar enormemente sus impactos.

---

<sup>29</sup> Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H. J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., & Spielmann, M. (2005). *The ecoinvent database: Overview and methodological framework* (7 pp). The International Journal of Life Cycle Assessment, 10(1), 3-9.

Además, se van a caracterizar también los impactos medioambientales que se asocian a dos tipos de sales fundidas y un aceite térmico.

La mejora de fluidos de almacenamiento térmico está provocando un desarrollo de nuevas sales fundidas. Así pues, este desarrollo no puede basarse solo en principios fisicoquímicos sino que deberá tener en cuenta las ventajas medioambientales que supone una correcta selección de materiales. Es por ello que se analiza esto en relación a la mejora que supone la sal solar Hitec frente a la binaria, que fue la primera sal en aparecer y que a día de hoy aparece mejorada con nuevas formulaciones como puede ser la Hitec.

Con esta tesis se sientan las bases para una apropiada selección de materiales en el área termosolar. Conociendo materiales que trabajan correctamente bajo factores fisicoquímicos como resistencia, tracción, corrosión, etc., se incluye la variable medioambiental como parte indispensable en la selección final de éstos y ello pasa por realizar ACVs.

A su vez, se cuantificará la cantidad de materiales necesarios para formar parte del sistema captación-intercambio-almacenamiento de una central de 50MW y otra de 150MW.

No se han encontrado estudios que pongan de manifiesto la mejora medioambiental que supone el uso de un sistema directo en relación a un sistema indirecto. Ello debe pasar obligatoriamente por el análisis detallado de los impactos que se evitan por sustituir el fluido de transferencia de calor (en este caso, aceite térmico) por el propio fluido de almacenamiento térmico (en este caso, sales fundidas). Es uno de los aspectos sobre el cual se investiga en este trabajo, para obtener las conclusiones pertinentes que se encontrarán en capítulos sucesivos. Ya que uno de los desarrollos en la tecnología termosolar actualmente, se encuentra en conseguir dispositivos capaces de hacer competitivos, fiables y técnicamente sostenibles, los sistemas directos. Es decir, aquellos que usan el mismo medio tanto como fluido caloportador como de almacenamiento térmico. Así pues, otro de los aportes de esta tesis será la comprobación de que la eliminación del aceite térmico y su sustitución por sales fundidas, presenta un mejor comportamiento medioambiental. Por lo tanto, el hecho de

conocer que funciona mejor desde la perspectiva de la sostenibilidad, es un punto a favor a la hora de continuar desarrollando estos dispositivos.

Los estudios encontrados que realizan Análisis de Ciclo de Vida en aplicaciones de energía termosolar, en ningún caso están centrados en una selección de materiales sino que se dedican a mostrar los impactos de unos materiales dados e incorporados en las plantas termosolares. Es decir, no se localizaron ACVs comparativos de materiales implicados en centrales termosolares. Además del análisis pormenorizado de procesos unitarios y comparativas entre aceros, fluidos de almacenamiento térmico y transferencia de calor, destaca de este trabajo de investigación la evaluación de 16 combinaciones de centrales termosolares posibles, para obtener conclusiones sobre la opción menos contaminante. Sumado al análisis de los puntos en los que se producen los mayores impactos y cómo, con una correcta selección de materiales, se pueden ver reducidos. Se pondrá de manifiesto la diferencia notable entre la opción menos favorable y la más favorable en materia de sostenibilidad ambiental, todo ello para dos potencias diferentes, donde se podrá comprobar la relación impacto medioambiental-potencia instalada en una central termosolar cilindro-parabólica.

## CAPÍTULO III

**3.ENERGÍAS RENOVABLES.  
ENERGÍA SOLAR TÉRMICA DE  
CONCENTRACIÓN.  
CENTRALES SOLARES  
CILINDRO-PARABÓLICAS.**

### 3.1. Uso de energías renovables.

A lo largo de toda la historia la explotación de los recursos energéticos ha marcado el comportamiento de las sociedades. Actualmente, el acceso a la energía determina las relaciones económicas y tecnológicas de las naciones como principal factor de competitividad.

Hasta la llegada de la máquina de vapor y la Revolución Industrial, el agua y el viento, eran los recursos utilizados para mover molinos, y la madera y los residuos agrícola-forestales la fuente de calor de los hogares.

A finales del siglo XVIII la máquina de vapor trajo consigo la Revolución Industrial, y en ella fue el carbón vegetal la base de la industrialización, pero no fue planificada. Fue una revolución económica, provocada por el deseo de adquisición de capital. Los industriales querían producir de la forma más eficiente posible; hacer llegar la mayor cantidad de bienes a la mayor cantidad de personas. En casi la totalidad de los sectores significaba cambiar de un sistema de trabajo manual a otro de mecanización eficiente. Así pues, se diseñó un sistema de producción tal que cada año miles de millones de kilogramos de materiales tóxicos son expulsados al aire, agua y suelo, se fabrican productos tan peligrosos que requieren vigilancia constante por parte de las futuras generaciones y se precisan complejas normativas legales, no para mantener intactos los sistemas naturales y las personas, sino para que no se envenenen demasiado rápido<sup>30</sup>.

El siguiente gran avance tecnológico que se produjo fue el motor de explosión<sup>31</sup> (por Nikolaus August Otto, en 1876) lo que supuso una aportación más al consumo de combustibles fósiles.

La década de 1950 se conoce como la era atómica, en la que estaba en auge el desarrollo nuclear y se tenía la creencia de que sería la base del aporte energético futuro. Incluso se introdujeron cuatro coches concepto de propulsión nuclear, dos estadounidenses y dos franceses. Ford Nucleon, Studebaker Packard Astral, Simca Fulgur y Arbel Symetric<sup>32</sup>.

---

<sup>30</sup> McDonough, W., & Braungart, M. (2010). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. MacMillan.

<sup>31</sup> Bryant, L. (1967). *The origin of the automobile engine*. Scientific American, 216(3).

<sup>32</sup> Durkin, C. (2012) *Nuclear Powered Passenger Vehicles*. Stanford University Press.

En la actualidad, sectores políticos y sociales rechazan esta tecnología de generación eléctrica, en buena medida por motivos ideológicos y no técnicos, ya que se puede vincular con los usos militares de la energía atómica. Si bien es cierto, no se puede obviar que existen tres grandes accidentes en centrales nucleares (Three Mile Island, Chernóbil y Fukushima). Del mismo modo, numerosos países siguen apostando por la generación eléctrica nuclear aun conociendo (a) su alto coste de inversión, (b) la seguridad de operación y respuesta ante accidentes extremos e incidentes, (c) la gestión y el tratamiento del combustible gastado y de los residuo de alta actividad y larga vida y (d) el control del plutonio generado para evitar su uso en la fabricación de armas atómicas. Por todo ello, es preciso, entonces, trabajar en la búsqueda de mejores soluciones a las dificultades de esta tecnología<sup>33</sup>. O bien, abandonarla progresivamente realizando una transición hacia un modelo completamente basado en energías renovables.

Inmersos en un escenario de deterioro medioambiental y calentamiento global, es primordial modificar el actual modelo energético y productivo, creando una economía basada en el valor a largo plazo con proyectos eficientes energéticamente y sostenibles.

A día de hoy, las energías fósiles constituyen el mayor volumen de producción de energía, mientras que la apuesta por las energías renovables es aún insuficiente. Las luchas por el control de los recursos energéticos tienen importantes consecuencias geopolíticas, convirtiéndose el mercado de la energía en el auténtico protagonista de las relaciones internacionales.

De todas formas, ya en el mundo entero se reconoce que el futuro de suministro eléctrico reside en las energías renovables. No solo fundamentado por los peligros y limitaciones de la energía fósil y nuclear, sino también por las tasas de crecimiento en implantación renovable, que lleva años suponiendo un reconocimiento de su potencial de utilización global, con un suministro energético real asegurado y sin riesgos a largo plazo.

El desafío es la apuesta firme por la implantación de las energías renovables así como la total protección del medio ambiente.

---

<sup>33</sup> Dopazo, C., & Mielgo, P. (2015). *La energía nuclear, hoy y mañana*. Funciva documentos. 233.



### **3.1.1. Cambio climático.**

Las investigaciones del Grupo de Estudios sobre la Paz de la Universidad de Bradford y Oxford<sup>34</sup>, concluyeron que las principales amenazas a la seguridad internacional son, entre otras, el cambio climático y la competencia por los recursos.

David A. King argumentó en Science que el cambio climático es el problema más grave al que se enfrenta la sociedad actual, incluso mayor que la amenaza del terrorismo y que muchos millones de personas en el mundo, que ahora no padecen esas amenazas, podrían verse expuestos a las hambrunas, sequías, inundaciones y enfermedades como, por ejemplo, la malaria<sup>35</sup> por causa de las modificaciones en el clima.

Para contrarrestar el escepticismo que pudiera surgir sobre si el cambio climático es real o no, los siguientes apartados están centrados en aportar algunos datos que la comunidad científica evidencia sobre el mismo.

#### **3.1.1.1. Emisiones de gases de efecto invernadero, GEIs.**

El efecto invernadero es un fenómeno natural gracias al cual se desarrolla la vida como la conocemos. Los gases de efecto invernadero (GEI) son aquellos que contribuyen a este efecto. El problema viene cuando sus concentraciones, presentes en la atmósfera de manera natural, se ven afectadas por la actividad humana, tal y como viene sucediendo desde la industrialización

Aproximadamente el 67% del CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera proviene de fuentes antropogénicas, es producido por la combustión de combustibles fósiles<sup>36</sup>.

Según Solomon. S, en su ciclo, de todo el CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera, el 45% permanece en ella, el 25% es absorbido por la tierra y el 30% por el océano, incidiendo no solo sobre la atmósfera, sino de manera directa en el ciclo bioquímico del océano, puesto que el CO<sub>2</sub> reacciona con el agua para finalmente formar un ácido débil, lo que

---

<sup>34</sup> Abbott, C., Rogers, P., Sloboda, J. A., & Blasco, F. (2008). *Más allá del terror: las verdaderas amenazas que acechan al mundo*. Los libros del lince.

<sup>35</sup> King, D. A. (2004). *Climate change science: adapt, mitigate, or ignore*. Science, 303(5655), 176-177.

<sup>36</sup> Solomon, S. (2007). *Climate change 2007*. Cambridge: Cambridge University Press.

produce lo que se ha denominado acidificación del océano. En el período comprendido entre 1750 y 1994, se calcula que el pH superficial se redujo en 0,1 pH<sup>37</sup>.

En el Instituto de Estudios Espaciales Goddard (GISS por sus siglas en inglés) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) desarrollaron en 2014 un modelo informático, llamado GEOS-5, en alta resolución que describe la circulación del dióxido de carbono en la atmósfera. El modelo toma datos reales sobre las condiciones atmosféricas y la emisión de gases de efecto invernadero y partículas, tanto naturales como artificiales. El modelo simula el comportamiento natural de la atmósfera de la Tierra de enero de 2006 hasta diciembre de 2006.

La simulación ilustra las diferencias en los niveles de dióxido de carbono en los dos hemisferios. En el hemisferio norte, las mayores concentraciones se sitúan alrededor de las grandes fuentes de emisión, que son, América del Norte, Europa y Asia<sup>38</sup>.

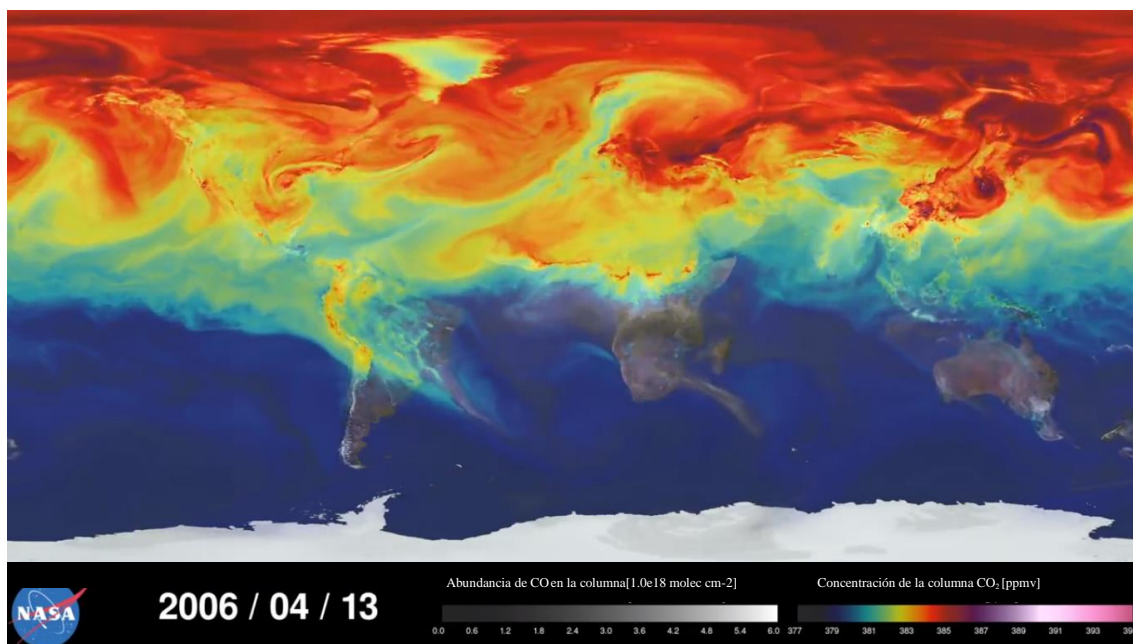


Figura 1. Concentración de CO<sub>2</sub> en el mes de abril de 2006. Fuente: nasa.gov

---

<sup>37</sup> Karl, D. M., & Lukas, R. (1996). *The Hawaii Ocean Time-series (HOT) program: Background, rationale and field implementation*. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 43(2), 129-156.

<sup>38</sup> sv.gsfc.nasa.gov,. (2016). *GMS: A Year In The Life Of Earth's CO2*. Accedido el 12 febrero 2016, desde <http://sv.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=11719>

En la simulación el gas no permanece inmóvil en un sitio, aparecen vórtices. Esta dispersión del CO<sub>2</sub> lejos de sus fuentes está determinada por los patrones climáticos dentro de la circulación global.

El ciclo de crecimiento de las plantas y árboles cambia con las estaciones. Durante la primavera y el verano, en el hemisferio norte, la vegetación absorbe una cantidad sustancial de dióxido de carbono a través de la fotosíntesis, lo que elimina de forma natural parte de este gas presente en la atmósfera. En la siguiente imagen se aprecia este cambio en el modelo. Los colores rojos y púrpuras, que representan altas concentraciones comienzan a desaparecer.

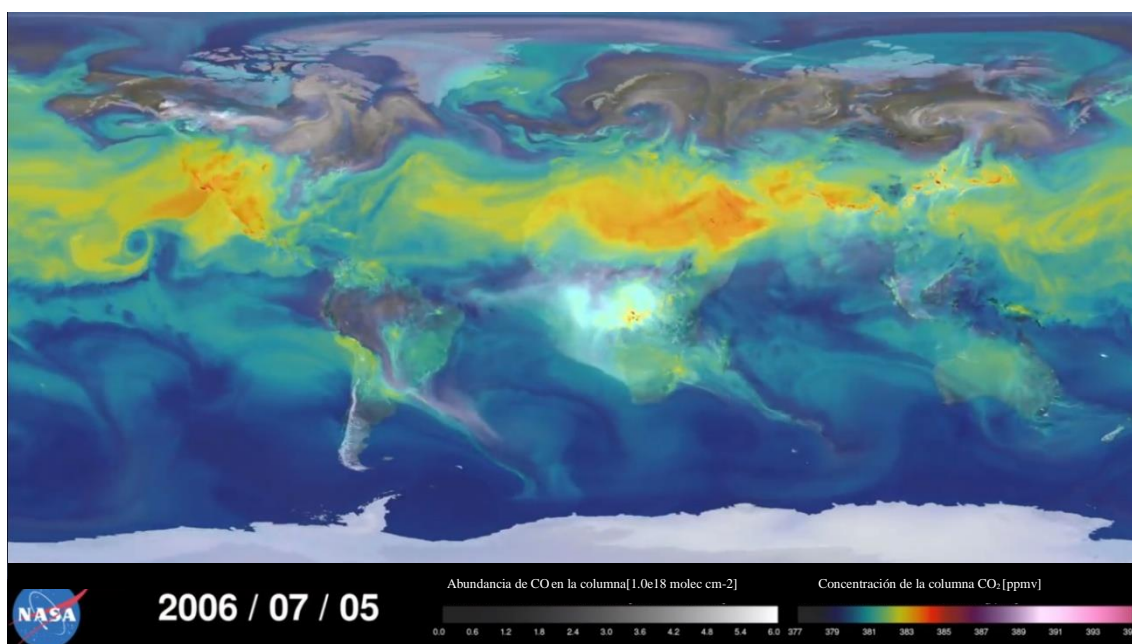


Figura 2. Concentración de CO<sub>2</sub> en el mes de julio de 2006. Fuente: nasa.gov

Cuando el verano termina, la fotosíntesis decrece y el CO<sub>2</sub> permanece en la atmósfera. Así pues, lo que se evidencia con esta simulación es que las concentraciones de CO<sub>2</sub> se van acumulando año tras año. Ha seguido aumentando desde una concentración de aproximadamente 278 partes por millón (ppm) en la era preindustrial (1750) a más de 390 ppm en 2011, con una tasa de aumento que asciende a 1,8 ppm al año<sup>39</sup>. El ciclo natural de CO<sub>2</sub>, actualmente no es capaz de mantenerse equilibrado aumentando sus niveles progresivamente.

---

<sup>39</sup> Change, I. C. (2013). The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. K., Tignor, M., Allen, SK, Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, PM, Eds, 1535.

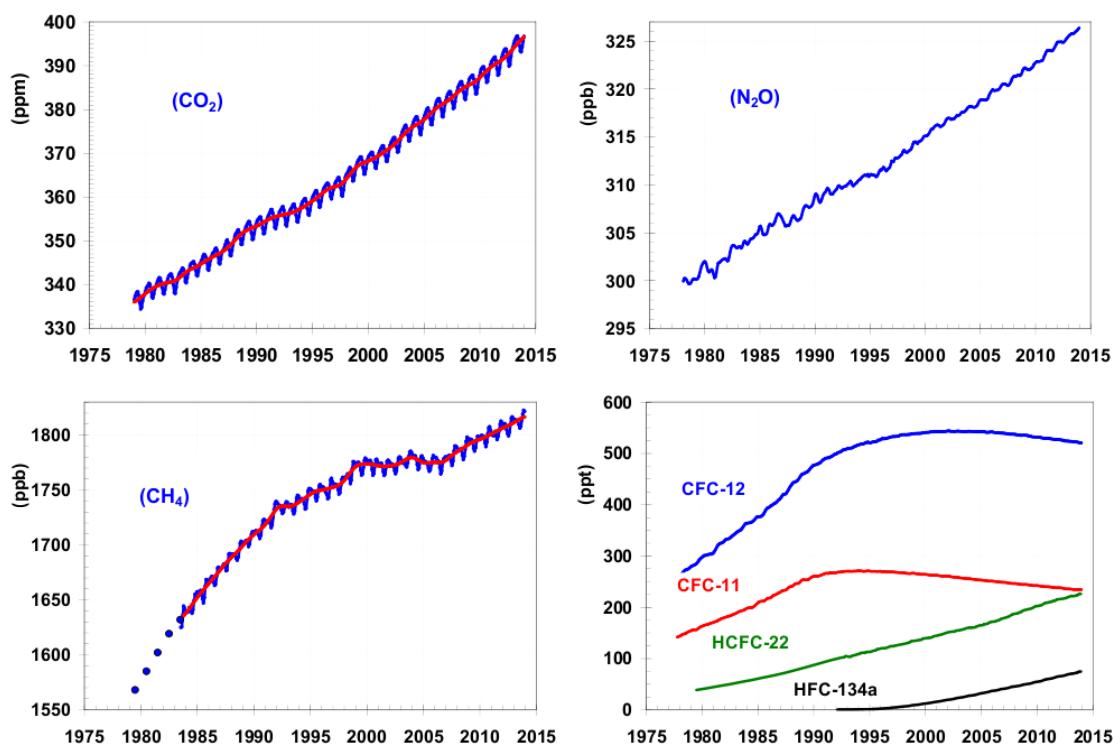


Figura 3. Concentración en la atmósfera de los principales GEI. Fuente: nasa.gov<sup>40</sup>

Otros GEIs también están viendo sus concentraciones atmosféricas en aumento tal y como puede apreciarse en la Figura 3.

La Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) en el inventario de emisiones de la Unión Europea<sup>41</sup> indica que los países integrantes se mueven en la dirección correcta. En 2014, el último año del que se disponen datos ya cerrados, las emisiones cayeron un 4,1% respecto al ejercicio anterior. La economía ha seguido creciendo en los dos últimos años y las emisiones se han estancado. Es decir, se empieza a apreciar que crecimiento y emisiones se han desligado. Pero este no es el caso de España, en España no se ha desconectado el crecimiento económico de las emisiones. Cuando el PIB empezó bajar en 2008, las emisiones bajaron. Pero en los dos últimos años PIB y emisiones han crecido.

<sup>40</sup> Team, E. NOAA/ESRL Global Monitoring Division - THE NOAA ANNUAL GREENHOUSE GAS INDEX (AGGI). *Esrl.noaa.gov*. Accedido el 24 de mayo 2016, desde <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>

<sup>41</sup> European Environment Agency, 2016,. (2016). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2014 and inventory report 2016*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

### 3.1.1.2. Anomalías en la temperatura del Planeta.

El aumento de la temperatura media mundial y el calentamiento del sistema climático son inequívocos<sup>42</sup>.

La mayor parte del aumento observado en la temperatura mundial desde mediados de siglo XX se debe al alza en las concentraciones de gases de efecto invernadero causada por el hombre<sup>43</sup>.

Aun eliminando las variaciones de temperatura a corto plazo (como pueden ser la variabilidad solar, los efectos volcánicos y el fenómeno El Niño), las señales de un calentamiento durante las últimas tres décadas son evidentes<sup>44</sup>.

Así pues, se confirma que el calentamiento observado no puede explicarse solo por factores naturales y, por lo tanto, es posible atribuirlo en su mayor parte a la influencia antropogénica<sup>45,46</sup>.

Existen numerosas fuentes que recopilan datos de temperatura de la Tierra de diferentes estaciones meteorológicas del mundo y la analizan. Hansen J. et al.<sup>47</sup> comparan el promedio mundial de temperatura de cada año con el promedio de 1951 a 1980. Este periodo de 30 años proporciona una línea de base para medir el calentamiento que la Tierra está experimentando. Así pues, se comprueba que los 10 años más cálidos se han producido desde 1998, continuando una tendencia de temperaturas muy por encima del promedio de del siglo XX.

---

<sup>42</sup> IPCC. (2007). *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Synthesis Report*. [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland

<sup>43</sup> Solomon, S. (Ed.). (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge University Press.

<sup>44</sup> Foster, G., & Rahmstorf, S. (2011). Global temperature evolution 1979? 2010. *Environmental Research Letters*, 6(4), 044022.

<sup>45</sup> Santer, B. D., Taylor, K. E., Wigley, T. M., Penner, J. E., Jones, P. D., & Cubasch, U. (1995). Towards the detection and attribution of an anthropogenic effect on climate. *Climate Dynamics*, 12(2), 77-100.

<sup>46</sup> Stott, P. A., Tett, S. F. B., Jones, G. S., Allen, M. R., Mitchell, J. F. B., & Jenkins, G. J. (2000). External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. *Science*, 290(5499), 2133-2137.

<sup>47</sup> Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2010). Global surface temperature change. *Rev. Geophys.*, 48(4).

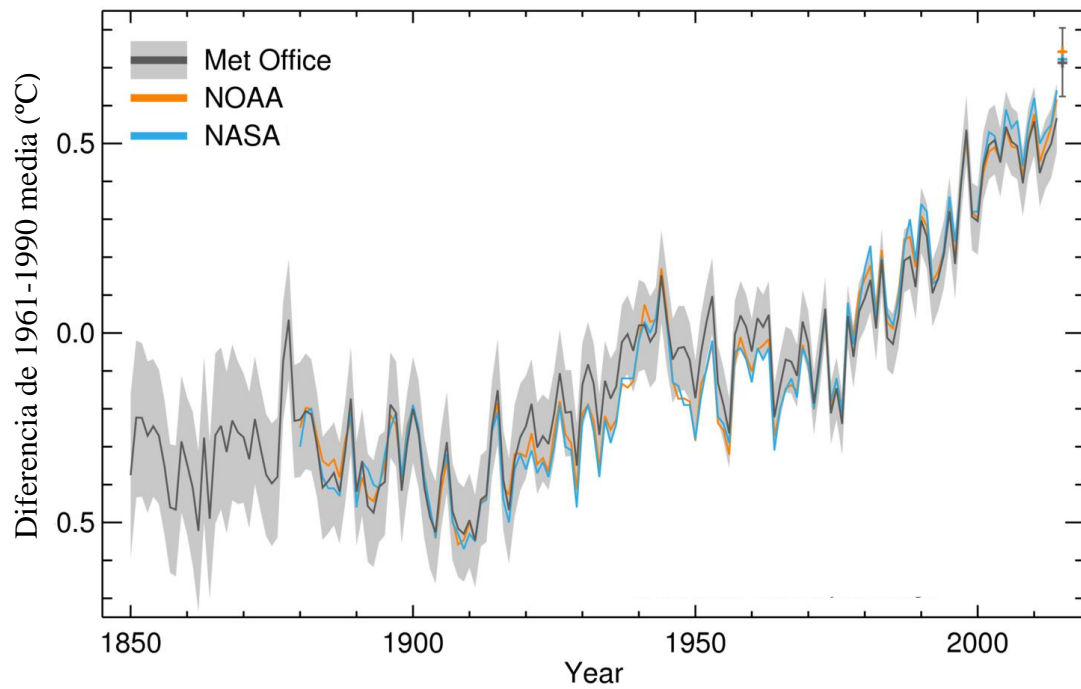


Figura 4. Datos sobre anomalías de temperatura media global de diferentes fuentes, Met Office, NOAA y NASA. Con datos desde 1850 hasta octubre de 2015. Comparándolos con la media del periodo 1961-1990 y representando su variación. La señal de calentamiento global es evidente. Fuente: Met Office,, (2016).<sup>48</sup>

---

<sup>48</sup>Met Office,, (2016). *2015: the warmest year on record, say scientists*. Accedido el 15 febrero 2016, desde <http://www.metoffice.gov.uk/news/releases/archive/2016/2015-global-temperature>



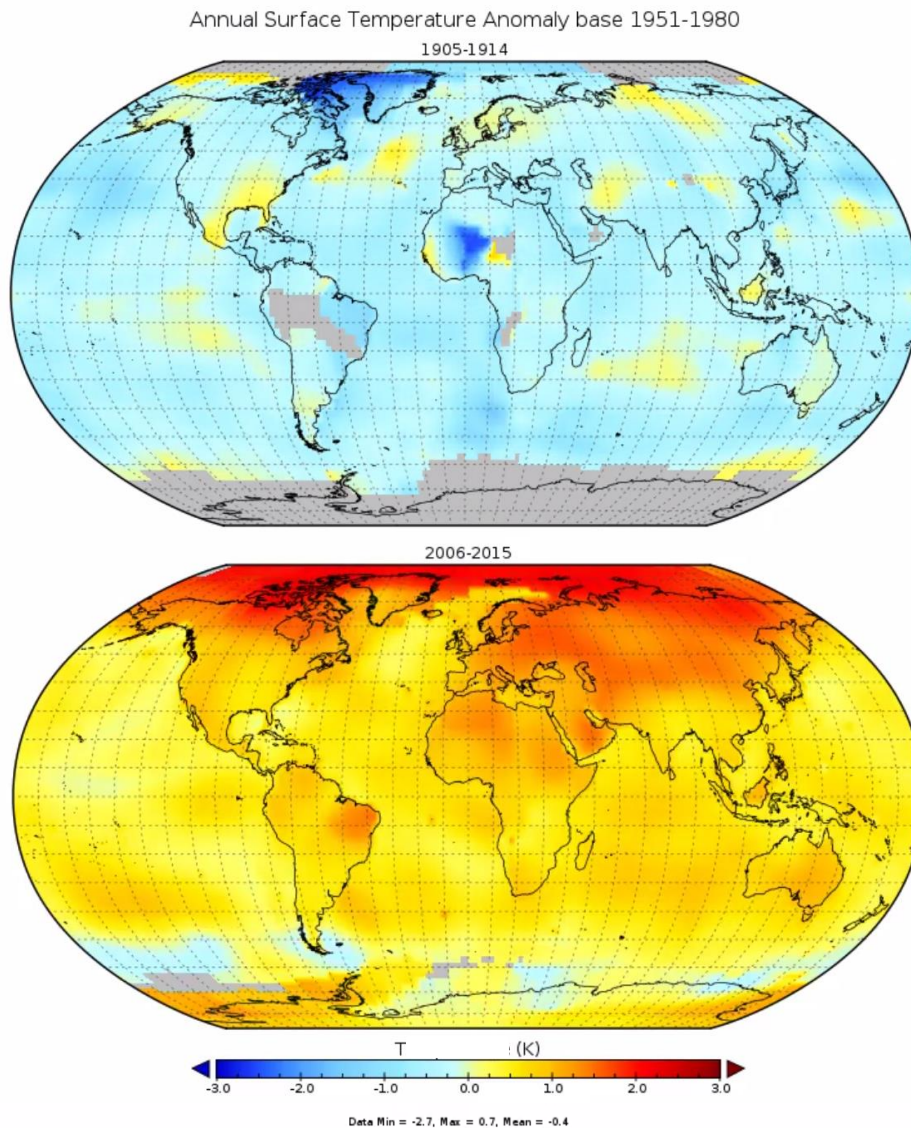


Figura 5. Representación de las anomalías de la temperatura superficial de la Tierra anual, tomando periodos de cinco años y comparándolos con los datos del periodo 1951-1980. Se aprecia como entre los datos del periodo 1905-1914 y el de 2006-2015 hay un cambio sustancial en la temperatura, se visualiza por el cambio de escala cromática entre ambos casos. Fuentes: GISTEMP Team, (2016)<sup>49, 50</sup>.

Las últimas observaciones indican que 2015 fue el año más caluroso del registro histórico. La Administración para el Océano y la Atmósfera de EEUU (NOAA, por sus siglas en inglés) dice que 2015 fue  $0,16^{\circ}\text{C} \pm 0,09^{\circ}\text{C}$  más cálido que el récord

<sup>49</sup> GISTEMP Team, (2016). *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP)*. NASA Goddard Institute for Space Studies. Accedido el 16 de febrero de 2016 desde <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.

<sup>50</sup> Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K., (2010). *Global surface temperature change*. Rev. Geophys., 48, RG4004, doi:10.1029/2010RG000345.

anterior, que era de 2014<sup>51</sup>. La NASA dice que el 2015 fue de 0,13 ° C +/- 0,10 ° C por encima de 2014<sup>52</sup>. Y la Oficina Meteorológica del Reino Unido (Met Office) dijo que el 2015 fue de 0,18 ° C + / - 0,10 ° C por encima de 2014<sup>53</sup>.

2014 ya confirmó una tendencia de calentamiento en la que nueve de los diez años más cálidos habían ocurrido después del inicio del siglo XXI. El nuevo récord sitúa los quince años ocurridos después del 2000 entre los dieciséis más calurosos de la lista. Aunque la tendencia se aprecia desde el comienzo de la industrialización, la mayor parte del ha ocurrido en los últimos 35 años.

La nueva medición sitúa por primera vez el aumento de la temperatura media global en 1°C de incremento sobre la temperatura de los últimos 20 años. Los tres métodos utilizados por la NOAA, la NASA y el Met Office coinciden en 2015 y muestran un incremento de 1°C sobre los niveles preindustriales.

Además, en la última década se ha registrado una cantidad excepcional de olas de calor extremo en todo el mundo, cuyos impactos han sido severos para los humanos<sup>54</sup>.

El calentamiento de la atmósfera inferior cambia el ciclo hidrológico, cuanto más cálido es el aire tiene más capacidad de acumular vapor de agua. Esto produce más sequía en las regiones secas e intensifica las precipitaciones en regiones lluviosas<sup>55</sup>.

La Agencia Internacional de la Energía (AIE) advierte de que, si no logramos controlar las emisiones antes de finales de 2017, la economía basada en combustibles fósiles habrá convertido en inevitable un nivel de calentamiento peligroso. La infraestructura energética instalada en ese momento generará el total de emisiones de CO<sub>2</sub> permitidas en nuestro presupuesto de carbono para conseguir un objetivo de calentamiento de solo 2°C, lo que no dejará margen para la construcción de centrales eléctricas adicionales, ni

---

<sup>51</sup> NOAA National Centers for Environmental Information. *State of the Climate: National Overview for January*. (2016), accedido el 15 de febrero de 2016 desde <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/national/201601>.

<sup>52</sup> GISTEMP Team (2016). *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP)*. NASA Goddard Institute for Space Studies. Accedido el 16 de febrero de 2016 desde <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.

<sup>53</sup> Met Office,. (2016). *2015: the warmest year on record, say scientists*. Accedido el 15 de febrero de 2016, desde <http://www.metoffice.gov.uk/news/releases/archive/2016/2015-global-temperature>.

<sup>54</sup> Coumou, D., Rahmstorf, S. (2012). *A decade of weather extremes*. Nature Climate Change, 2, 491–496.

<sup>55</sup> Trenberth, K. E. (2010). *Changes in precipitation with climate change*. Climate Research, 47, 123–138.



de fábricas, ni de ninguna otra infraestructura que no sea de carbono cero, y eso resultará exorbitantemente costoso<sup>56</sup>.

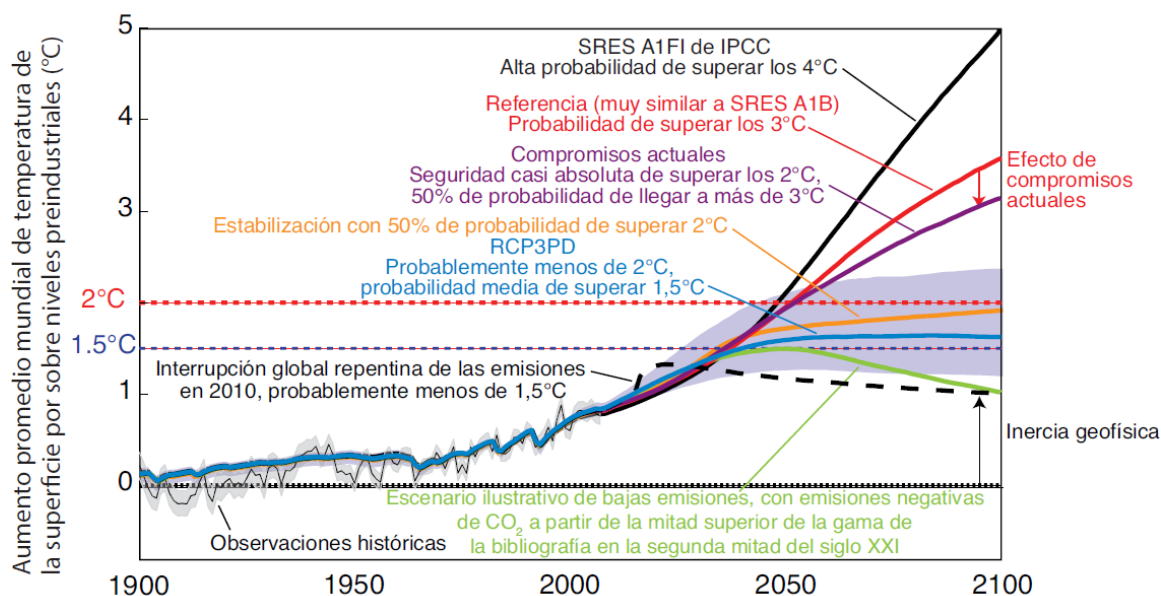


Figura 6. Representación del aumento promedio de temperatura con diferentes escenarios. Fuente: Banco Mundial. Informe Bajemos la temperatura.

El Banco Mundial, en su informe Bajemos la temperatura<sup>57</sup>, recoge posibles escenarios<sup>58</sup> (Figura 6). Si se hubiera producido una interrupción global de las emisiones en 2016, indica que probablemente se habría podido no superar el aumento de la temperatura mundial en 1,5°C. Marca como escenario hipotético en azul, la tendencia que deberían seguir las emisiones si se desean establecer en un aumento entre 1,5 y 2°C y en naranja la proyección que seguirían si se estabilizan, con un 50% de posibilidades de superar los 2°C. Propone otros como aquellos que apuntan que aun cumpliendo los compromisos actuales, hay una seguridad casi absoluta de superar los 2°C.

En negro y rojo, aparecen estimaciones medias derivadas de proyecciones de probabilidad de la temperatura para dos escenarios que no contemplan medidas de mitigación de las emisiones (A1FI del Informe especial sobre escenarios de emisiones

<sup>56</sup> Cozzi, L. (2011). *World Energy Outlook 2011*. International Energy Agency.

<sup>57</sup> Schellnhuber, H. J., Hare, W., Serdeczny, O., Adams, S., Coumou, D., Frieler, K., & Rocha, M. (2012). *Turn down the heat: why a 4 C warmer world must be avoided* (p. 106). World Bank.

<sup>58</sup> Rogelj, J., Meinshausen, M., & Knutti, R. (2012). *Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates*. *Nature climate change*, 2(4), 248-253.

uno muy similar al A1B también de dicho informe<sup>59</sup>), que en ambos casos se aproximan, o superan por un margen considerable, el calentamiento de 4°C para 2100.

Los escenarios de 4°C son devastadores: inundaciones en las ciudades costeras; aumento de los riesgos relativos a la producción de alimentos; olas de calor sin precedentes, aumento de la escasez de agua; aumento de la frecuencia de los ciclones tropicales, y pérdida de biodiversidad.

Durante la 21ª Conferencia de las Partes (COP21) en París, Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, 195 países acordaron limitar el calentamiento global por debajo de los 2°C<sup>60</sup>.

### 3.1.1.3. Subida del nivel del mar.

El nivel del mar ha subido unos 8 centímetros desde 1992<sup>61</sup>. Es causa de ello el deshielo de los glaciares; se estima que para un calentamiento de masa de hielo de 1°C, un glaciar disminuye 0,4 metros por año. Esto corresponde a un aumento del nivel del mar de 0,58 milímetros por año<sup>62</sup>. Otra causa es el calentamiento de los océanos así como de las grandes masas de hielo de los casquetes polares; el enfriamiento y el calentamiento del agua antártica de fondo produce una subida del nivel del mar de  $0,37 \pm 0,15$  mm año asociado expansión térmica<sup>63</sup>.

---

<sup>59</sup> Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., & La Rovere, E. L. (2000). *Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (No. PNNL-SA-39650). Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (US).

<sup>60</sup> Robbins, A. (2016). *How to understand the results of the climate change summit: Conference of Parties21 (COP21) Paris 2015*. Journal of public health policy.

<sup>61</sup> Climate.nasa.gov,. (2016). Accedido 14 febrero 2016, desde [http://climate.nasa.gov/climate\\_resources/125/](http://climate.nasa.gov/climate_resources/125/)

<sup>62</sup> Oerlemans, J., & Fortuin, J. (1992). *Sensitivity of Glaciers and Small Ice Caps to Greenhouse Warming*. Science, 258(5079), 115-117.

<sup>63</sup> Purkey, S. G., & Johnson, G. C. (2013). *Antarctic Bottom Water warming and freshening: Contributions to sea level rise, ocean freshwater budgets, and global heat gain*. Journal of Climate, 26(16), 6105-6122.

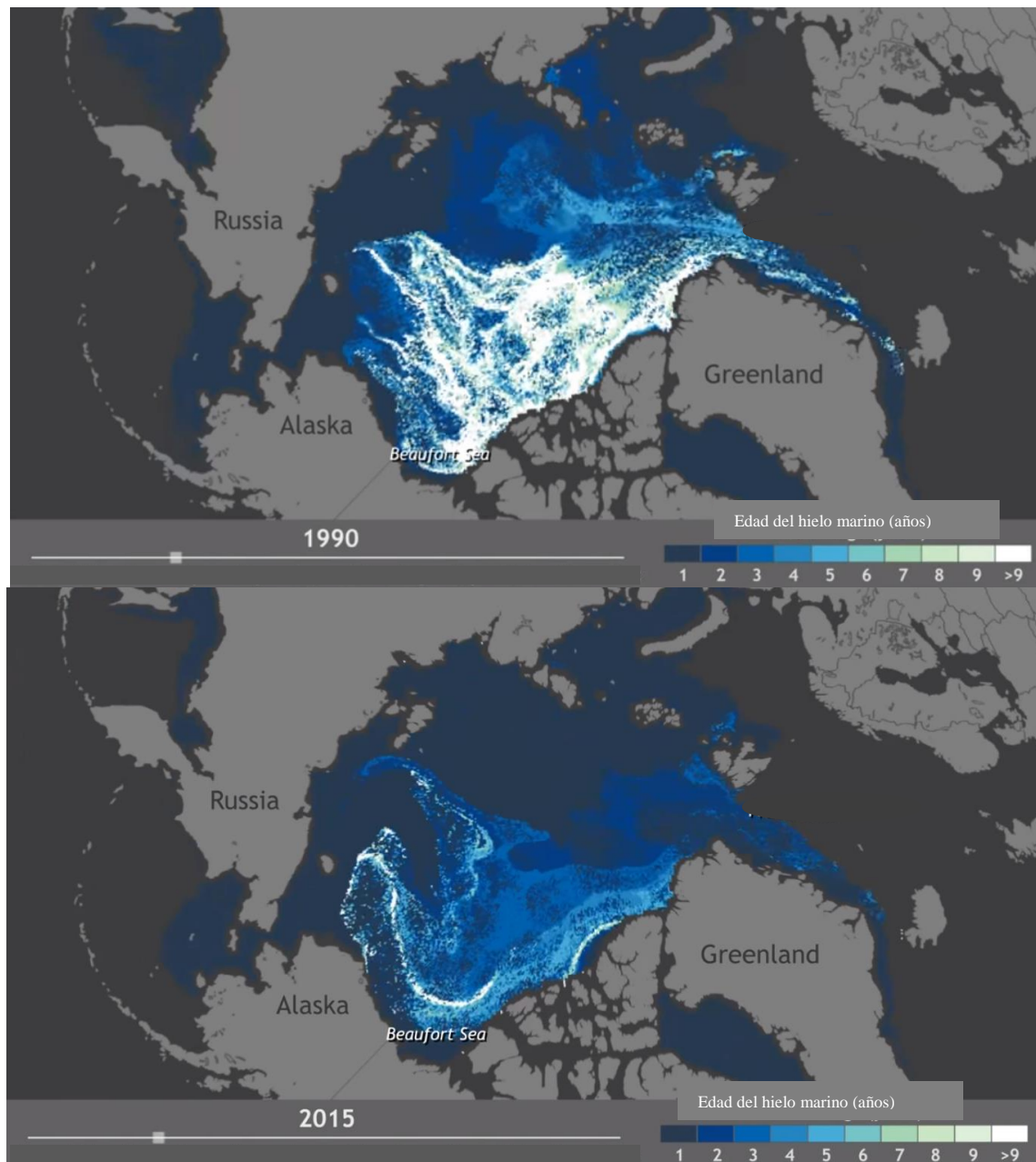


Figura 7. Imagen comparativa entre el estado del hielo ártico en marzo de 1990 y marzo de 2015. Los niveles de hielo del Océano Ártico se encuentran en declive. . Los colores blanquecinos representan el hielo más antiguo. Se aprecia cómo las grandes bolsas de hielo que sobreviven más de un verano son cada vez menos. Este hielo que se funde, contribuye a la subida del nivel del mar. Fuente: nasa.gov.

Se ha avanzado notablemente desde la salida en 2007 del Cuarto Informe (4IE) del IPCC<sup>64</sup>. Se ha sugerido que las estimaciones de la futura subida del nivel del mar que indicaba el 4IE del IPCC podrían haber sido subestimadas.

Diversos enfoques para abordar este problema han sido probados, incluyendo modelos semi-empíricos y estudios conceptuales. Concluyendo que la estimación media de dichas contribuciones es de 29 cm sustancialmente mayores que en el 4IE, lo que implica un riesgo concebible de un aumento del nivel del mar de más de un metro para el año 2100<sup>65</sup>.

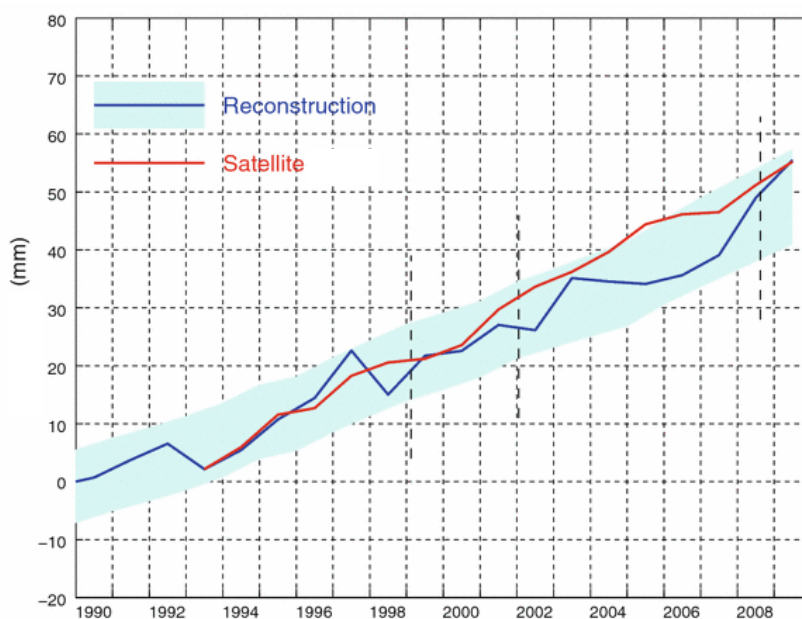


Figura 8. Media Global del nivel del mar de 1990 a 2009. Reconstruidos a partir de datos mareógrafos tarados a cero en 1990 (línea azul, con una incertidumbre de desviación estándar) y procedentes altimetría satelital desde 1993 (línea roja). Fuente: Church, J. A., & White, N. J. (2011)<sup>66</sup>.

El calentamiento de los océanos y el deshielo de glaciares y de las grandes masas de hielo de los casquetes polares está poniendo en riesgo el futuro de numerosas ciudades y pueblos costeros en todo el mundo.

<sup>64</sup> Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., & Miller, H. L. (2007). *Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2007*. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.

<sup>65</sup> Bamber, J. L., & Aspinall, W. P. (2013). *An expert judgement assessment of future sea level rise from the ice sheets*. Nature Climate Change, 3(4), 424-427.

<sup>66</sup> Church, J. A., & White, N. J. (2011). *Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century*. Surveys in Geophysics, 32(4-5), 585-602.

Si se analiza el comportamiento hidrológico de las grandes masas continentales, actualmente existen estudios que observan patrones globales de almacenaje de agua en tierra. Esa acumulación terrestre habría ralentizado la subida del mar en un 20 por ciento<sup>67</sup>. Pero no es ningún resguardo. Se debe ver como un factor de corrección a la hora de hacer los cálculos de cara a futuras políticas encaminadas a frenar el cambio climático. El estudio de Reager, J. T., et al. indica comportamientos tales que las regiones más húmedas se volverán más húmedas y las más secas aún más secas. Se aprecia la importancia de los cambios hidrológicos motivados por los cambios del clima.

### **3.1.2. Seguridad, dependencia y geopolítica energética.**

El agotamiento de los recursos energéticos convencionales, la preocupación por el suministro de agua y energía y los impactos económico-sociales derivados del cambio climático, serán causas principales de futuras crisis de la economía mundial<sup>68</sup>. Anticiparse a ellas debiera ser la prioridad actual de cualquier nación.

Existe la llamada elipse estratégica de energía, un área que se extiende desde Península Arábigas a Siberia Occidental, donde se concentran alrededor del 70% de las reservas probadas de petróleo y gas del mundo<sup>69</sup>.

Actualmente, el mundo demanda cantidades de petróleo de casi 1.000 barriles por segundo<sup>70</sup>. Y las reservas probadas de combustibles fósiles son progresivamente decreciente<sup>71</sup>.

Desde hace dos décadas, tras el derrumbe de la URSS, las grandes potencias mundiales libran una batalla por el control de los yacimientos de gas y petróleo de las antiguas repúblicas soviéticas de Asia central y el Cáucaso. Focalizada en el trazado de los gaseoductos y los oleoductos, esta batalla implica potencias antiguas y emergentes.

---

<sup>67</sup> Reager, J. T., Gardner, A. S., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Eicker, A., & Lo, M. H. (2016). *A decade of sea level rise slowed by climate-driven hydrology*. Science, 351(6274), 699-703.

<sup>68</sup> Shiva, V. (2015). *Soil not oil: Environmental justice in an age of climate crisis*. North Atlantic Books.

<sup>69</sup> Armaroli, N., & Balzani, V. (2007). *The future of energy supply: challenges and opportunities*. Angewandte Chemie International Edition, 46(1-2), 52-66.

<sup>70</sup> Tertzakian, P. (2006). *A thousand barrels a second*. McGraw-Hill.

<sup>71</sup> Simmons, M. R. (2005). *Twilight in the Desert*. Hoboken.

Un indicativo de ello podrían ser las emisiones de GEIs por países. Un estudio realizado<sup>72</sup> en el periodo 1990-2012 indicó que los 10 mayores emisores (en orden, China, Estados Unidos, la Unión Europea tomada como su conjunto de países, India, Rusia, Japón, Brasil, Indonesia, México, e Irán) suponen un 72% del total de las emisiones globales de gases de efecto invernadero a nivel mundial. China aporta aproximadamente el 25% de las emisiones globales. India, Indonesia, Brasil, México e Irán también están contribuyendo de manera más significativa acciones a medida que crecen sus economías. Los 100 países más bajos en emisiones, juntos, contribuyen en menos del 3 por ciento. Así pues, se aprecia claramente como economías consolidadas como la estadounidense o la europea se batan el duelo con emergentes como China o Brasil.

Además de todo lo anterior, cabe destacar que el sector energético es la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero, aportando más del 75%<sup>73</sup>.

El sistema energético mundial se encuentra actualmente bajo presión. La única gran fuente de petróleo (alrededor de un tercio de las reservas mundiales) de bajo coste es Oriente Medio y las continuas revueltas acaecidas en los últimos tiempos no hacen más que agravar un clima de inestabilidad energética. En cuanto al gas, el conflicto entre Rusia y Ucrania suscita inquietud de suministro<sup>74</sup>.

La seguridad energética es un asunto de actualidad que preocupa a todas las naciones. Sin embargo, el análisis cuantitativo de los riesgos de suministro eléctrico energía presenta dificultades metodológicas importantes. Un reciente estudio<sup>75</sup> ha estimado cuantitativamente el riesgo geopolítico de suministro de energía con la ayuda de una técnica estadística multivariante. Cuatro factores de riesgo de energía parciales se calcularon para 122 países, los cuales fueron agregados posteriormente para formar el GESRI (por sus siglas en inglés, índice geopolítico del riesgo de abastecimiento energético). Los resultados demuestran que las economías avanzadas presentan un menor nivel de riesgo energético, especialmente los países con recursos energéticos

---

<sup>72</sup> CAIT Climate Data Explorer - Top 10 Emitters 2012. (2016). *Johannes-friedrich.com*. Accedido el 21 mayo 2016, desde <http://johannes-friedrich.com/circle/circle.htm>

<sup>73</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* (Vol. 3). Cambridge University Press.

<sup>74</sup> International Energy Agency, IEA (2014). *World Energy Outlook*. IEA.

<sup>75</sup> Muñoz, B., García-Verdugo, J., & San-Martín, E. (2015). *Quantifying the geopolitical dimension of energy risks: A tool for energy modelling and planning*. Energy, 82, 479-500.

propios, mientras que los países menos desarrollados se registran mayores niveles de riesgo, independientemente de su producción de energía.

Además, un panel de expertos advirtió durante la última jornada de la segunda Asamblea de Naciones Unidas sobre Medioambiente (UNEA), que el cambio climático tiene un efecto multiplicador en los conflictos armados. El cambio climático genera tensiones en la agricultura y el acceso al agua, y los gobiernos y la sociedad responden a esa amenaza<sup>76</sup>.

Las energías renovables son autóctonas, independientes energéticamente de conflictos con economías basadas en el petróleo y el control de las redes de gaseoductos con lo que aportan, por tanto, seguridad energética a las naciones que confían en ellas. Siendo su apuesta una gran decisión geopolítica en lo que a materia de energía se refiere.

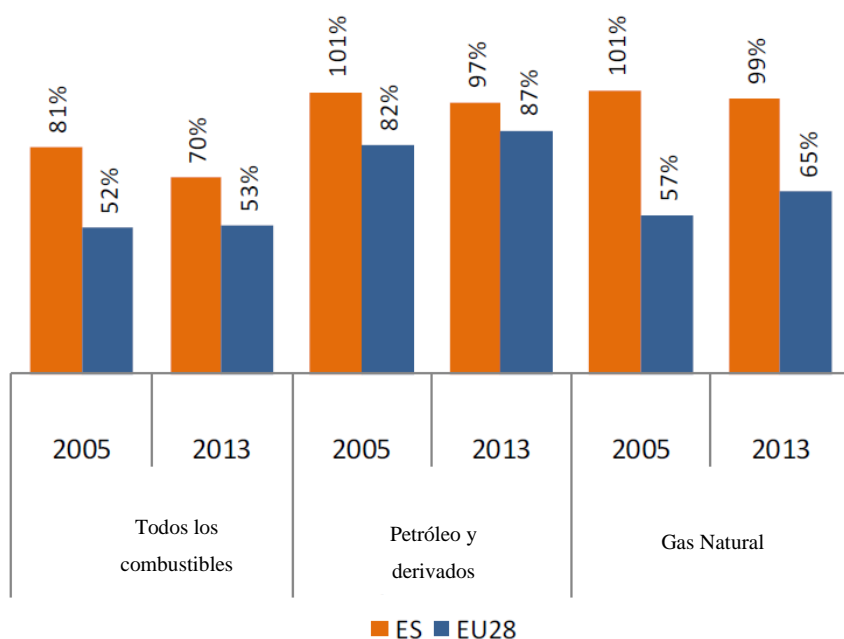


Figura 9. Dependencia de las importaciones españolas en 2013. Fuente: DG ENER, con datos de EUROSTAT.

Particularmente en España, el principal problema en materia energética es la dependencia de combustibles fósiles, petróleo y gas principalmente. Aproximadamente el 100% del petróleo que consume España procede de fuera; y prácticamente el 100%

<sup>76</sup> Brunch, C. *Second Meeting of the UN Environment Assembly (2016)*. Nairobi, Kenya.

del gas natural (Nigeria, Qatar, Argelia). España se encuentra 17 puntos por encima de la dependencia energética media de los países de la Unión Europea<sup>77</sup>.

Los términos dependencia, seguridad y geopolítica energética están íntimamente relacionados. Y las energías renovables los resuelven aportando seguridad energética, sin dependencias de economías con posibles conflictos y creando valor añadido a las naciones que las implementan.

### **3.1.3. Acceso a la energía.**

En la actualidad, 1.300 millones de personas en el planeta (el 20% de la población) no tienen acceso a la energía eléctrica y 2.700 millones dependen de la leña para calentarse y cocinar<sup>78</sup>.

El acceso a la energía es crítico para que los seres humanos alcancen un nivel de desarrollo digno. Sin embargo, el derecho a disponer de energía no formó parte explícita de la declaración de los Derechos Humanos.

Tampoco fue incluido en los ocho Objetivos del Milenio en la Asamblea número 55 de las Naciones Unidas celebrada en el año 2000, en la que se aprobó la Declaración del Milenio.

Los ocho Objetivos del Milenio fueron un hito histórico en justicia global. En todos se ha avanzado, pero ninguno se ha conseguido plenamente. Este hecho es el punto de partida para fijar los nuevos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), hasta 2030. En ellos, el proyecto Sustainability Energy for All<sup>79</sup> lanzado por Naciones Unidas sí que reconoce ese rol del acceso a la energía, vertebrando una serie de objetivos para que se alcance el servicio universal en el año 2030.

---

<sup>77</sup> European Commission,. (2015). *State of the Energy Union. Country Factsheet Spain..* Brussels.

<sup>78</sup> González-Eguino, Mikel (2014) *La pobreza energética y sus implicaciones*. BC3 Working Paper Series 2014-08. Basque Centre for Climate Change (BC3). Bilbao, Spain.

<sup>79</sup> United Nations,. (2014). *Sustainable Energy for All..*



El séptimo de los ODS indica: garantizar el acceso a una energía asequible, segura y sostenible<sup>80</sup>, con metas claras para 2030:

- Garantizar el acceso universal a servicios de energía, asequibles, fiables y modernos.
- Aumentar sustancialmente el porcentaje de la energía renovable en el conjunto de fuentes de energía.
- Duplicar la cuota de energías renovables en el mix energético global.

Proponiendo una manera de actuar tal que aumente la cooperación internacional a fin de facilitar el acceso a la investigación y las tecnologías energéticas no contaminantes, incluidas las fuentes de energía renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías de energía no contaminante. Así como ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios de energía modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados y los pequeños Estados insulares en desarrollo.

---

<sup>80</sup> United Nations,. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*..



Capacidad en 2015	GW
Total renovable	1.849
Hidráulica <50MW	1.064
Bioenergía	106
Geotermia	13,2
Fotovoltaica	227
Solar Térmica de concentración	4,8
Eólica	433

Tabla 1. Capacidad renovable instalada a finales de 2015 en el mundo. Fuente: REN 21 (2016).

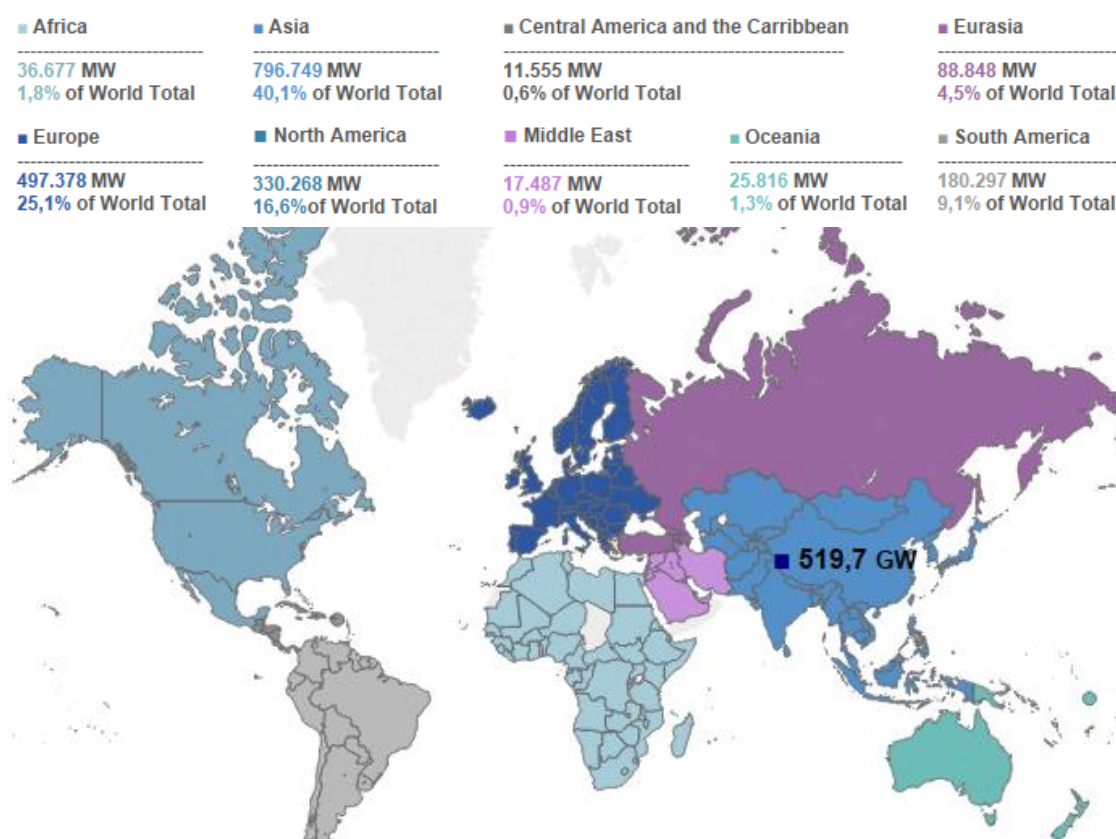


Figura 11. Situación actual de las energías renovables a nivel mundial. Datos de capacidad instalada a final de 2015. Fuente: IRENA<sup>82</sup>.

Según se puede apreciar en la Figura 11 como Asia dispone de, en torno a, 40% de la capacidad mundial instalada en energías renovables, debido, en gran medida por los 519,7 GW de China. Seguido se encuentra Europa y luego América del Norte. Cabe destacar la contribución al total del 9,1% de energía renovable procedente de

<sup>82</sup> Data and Statistics - IRENA Resource. (2016). Accedido 1 junio 2016, desde <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=17>

Sudamérica, que denota que las economías emergentes están apostando por las energías limpias.

El crecimiento rápido que están experimentando las energías renovables viene impulsado por varios factores, como son el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables; iniciativas políticas (cada vez más países incorporan políticas en materia renovable, ver Figura 10); seguridad energética y conservación del medio ambiente; demanda creciente de energía en economías en desarrollo y emergentes; y la necesidad de acceso a una energía modernizada. Por todo ello, en los países en desarrollo están surgiendo mercados nuevos, tanto para la energía renovable centralizada como para la distribuida.

<b>Inversión en 2015</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
EERR en general	China	EEUU	Reino Unido
Geotermia	Turquía	EEUU	México
Fotovoltaica	China	Japón	EEUU
Solar térmica de concentración	Marruecos	Sudáfrica	EEUU
Hidráulica	China	Brasil	Turquía
Eólica	China	EEUU	Alemania

Tabla 2. Países que más dinero han invertido en energías renovables en 2015. Fuente: REN21

La inversión mundial, en energías y combustibles renovables en los países desarrollados y en desarrollo dispone de un crecimiento significativo.

La implantación de energías renovables a nivel mundial es imparable. A inicios de 2015, 164 países habían definido objetivos de energía renovable, aumentando éstos hasta 173 países en 2016. Y ya las políticas de regulación en el sector eléctrico abarcan más del 87% de la población mundial, mientras que las políticas en climatización así como en el transporte comprenden un 50 % y un 73 % respectivamente<sup>83</sup>.

<sup>83</sup> Ren21, R. (2016). *Global status report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, France.

ENERGÍAS RENOVABLES. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA DE CONCENTRACIÓN  
CENTRALES SOLARES CILINDRO-PARABÓLICAS.

Capacidad total en 2015	1	2	3
EERR en general	China	EEUU	Brasil
Geotermia	EEUU	Filipinas	Indonesia
Fotovoltaica	China	Alemania	Japón
Solar térmica de concentración	España	EEUU	India
Hidráulica	China	Brasil	EEUU
Eólica	China	EEUU	Alemania

Tabla 3. Países con mayor capacidad instalada en energías renovables a finales de 2015. Fuente: REN21

Del último informe del REN21 (2016), se pueden obtener números datos, a continuación se exponen algunos de ellos:

- 2015 ha sido un año récord para la energía solar fotovoltaica y la energía eólica, representando alrededor del 77% de las nuevas instalaciones.
- Actualmente, el mundo entero suma más capacidad de electricidad renovable al año que la capacidad (neta) de todos los combustibles fósiles combinados.
- A finales del 2015, la capacidad de energía renovable era suficiente para abastecer aproximadamente el 23.7% de la electricidad mundial, en conjunto con la energía hidráulica, que proporciona alrededor del 16.6%.
- Durante el 2015, se añadió un estimado de 147 gigavatios (GW) de capacidad de energía renovable, el mayor incremento anual jamás registrado.
- La inversión mundial en renovables alcanzó un nuevo récord alcanzando los 285,9 miles de millones de dólares en electricidad y combustibles. Además, China fue el país que más invirtió en renovables en general, seguido de Estados Unidos y Reino Unido (ver Tabla 2).
- El mapa de capacidad o generación renovable total a finales de 2015 indica que, analizando las energías renovables en su conjunto, China también se encuentra a la cabeza del mundo, seguida de Estados Unidos, Brasil, Alemania y Canadá. Si se particulariza para el caso de energía renovable per cápita, el panorama cambia y queda de la siguiente forma: Dinamarca, Alemania, Suecia, España y Portugal. En la Tabla 3 se puede observar cómo España tan solo está en el número uno en la tecnología solar térmica de concentración.

### 3.2.1. Situación en España.

El punto de partida debe situarse en el año 2007, cuando se creó un sistema que garantizaba el cobro de determinada retribución durante toda la vida útil de la planta vinculada a la venta de energía eléctrica mediante fuentes renovables. Fue Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

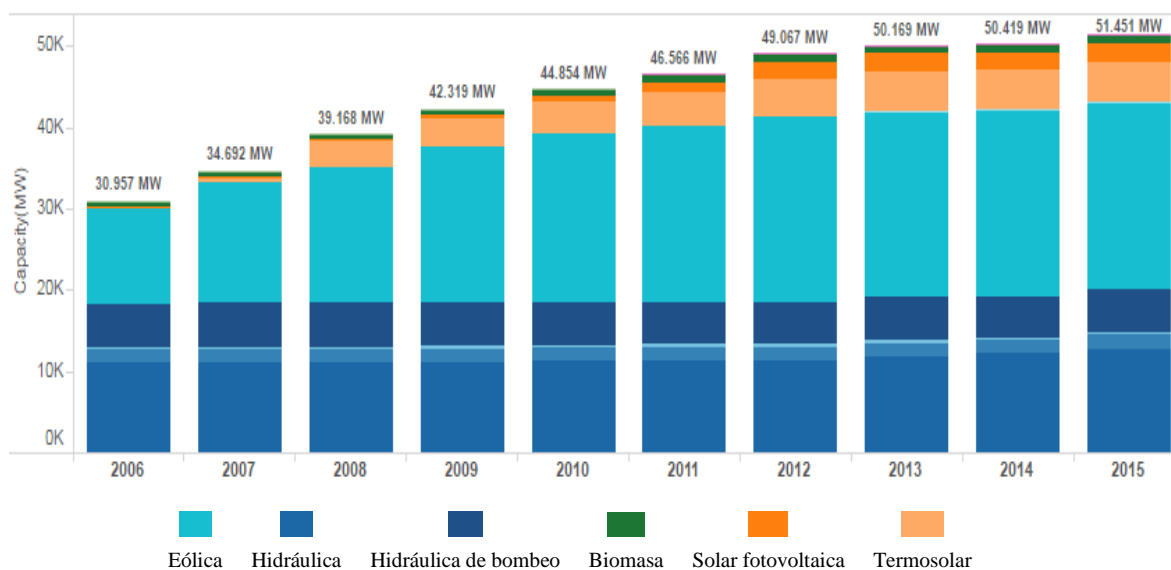


Figura 12. Capacidad renovable acumulada en España. Fuente: IRENA<sup>84</sup>

Este régimen retributivo tuvo un enorme éxito, e hizo que se alcanzara una potencia de energía fotovoltaica casi diez veces superior al objetivo que se había fijado el Gobierno. También en tecnología termosolar y eólica España se convirtió en uno de los líderes mundiales, y las empresas del país comenzaron a exportar su tecnología al mundo.

La aprobación en 2012 del Real Decreto-ley 1/2012, de 27 de enero, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos fue el comienzo de una etapa de retroceso en lo materia energética en España.

<sup>84</sup> IRENA Resource. (2016). Resourceirena.irena.org. Accedido 28 mayo 2016, desde <http://resourceirena.irena.org/gateway/countrySearch/?countryCode=ESP>

Las dos tendencias se pueden apreciar claramente en la Figura 12. La etapa de crecimiento hasta 2012 y el estancamiento tras la aprobación de las nuevas consideraciones.

Ahora muchas de las energías renovables han alcanzado la paridad de red y podrían ser competitivas sin necesidad de ser primadas<sup>85</sup>. Pero en 2007 no existía, por tanto el carácter retroactivo con que se aplicaron las medidas ha afectado a quienes invirtieron en renovables en aquel entonces; que haya abaratamiento de costes de esa tecnología una vez instalada la planta no conlleva un abaratamiento de los costes de esa planta ya en funcionamiento. Así pues la inseguridad jurídica trajo consigo el estancamiento en España<sup>86</sup>, perdiendo posiciones en los rankings y yendo al contrario de lo que sucede en el resto del mundo.

De hecho, tal y como se ha comentado en con anterioridad en el punto 3.1.1.1, las emisiones están comenzando a presentar una tendencia a la baja en economías desarrolladas. No es el caso de España y esto se puede comprobar en el último informe de Red Eléctrica Española<sup>87</sup> debido a que la demanda de electricidad se ha cubierto con más carbón y gas y menos renovables que años anteriores.

España tiene una sobrecapacidad instalada en ciclos combinados<sup>88</sup>. Desde 2002 hasta 2011 se han instalado 67 ciclos, para albergar una potencia instalada de 25.353 MW megavatios, la tecnología con mayor capacidad en toda España. La inversión total de estas plantas ha sido de 13.161 millones de euros. En el momento precrisis, año 2008, la generación de todas las Centrales de Ciclos Combinados ascendió a más de 91.000 Gwh. Teniendo en cuenta que en 2013<sup>89</sup> dichas centrales produjeron algo más de 25.000 Gwh, la generación de las mismas ha caído un 72% en los últimos cinco años. Lo que denota que están sobredimensionadas, haciendo de ello uno de los mayores problemas energéticos del país.

---

<sup>85</sup> Guerrero-Lemus, R., González-Díaz, B., Ríos, G., & Dib, R. N. (2015). *Study of the new Spanish legislation applied to an insular system that has achieved grid parity on PV and wind energy*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 426-436.

<sup>86</sup> Alonso, P. M., Hewitt, R., Pacheco, J. D., Bermejo, L. R., Jiménez, V. H., Guillén, J. V., & de Boer, C. (2016). *Losing the roadmap: Renewable energy paralysis in Spain and its implications for the EU low carbon economy*. Renewable energy, 89, 680-694.

<sup>87</sup> Red Eléctrica de España, R. E. E. (2016). *El sistema eléctrico español 2015*.

<sup>88</sup> Deloitte., (2016). *European Energy Market Reform. Country profile: Spain*.

<sup>89</sup> Red Eléctrica de España, R. E. E. (2014). *El sistema eléctrico español 201*.

España, que en 2008 era, por ejemplo, la segunda potencia mundial del sector fotovoltaico por capacidad instalada, sólo superada por Alemania, hoy prácticamente ha desaparecido del mapa mundial cuando se hacen previsiones sobre lo que va a ser de esta tecnología en los próximos cinco años<sup>90</sup>.

La Unión Europea advierte de que no se alcanzará el objetivo del 20% renovable antes de 2020 mientras propone un 30% en generación renovable antes de 2030. Y a España se le acumulan las demandas de arbitraje internacional por causa de no cumplir lo pactado en el ámbito jurídico de las energías renovables<sup>91</sup>.

### **3.3. Energía solar termoelectrica.**

La cantidad de energía que llega a la Tierra procedente del sol, sería sobradamente suficiente para abastecer las necesidades de consumo humano.

La potencia que recae sobre la Tierra es de, aproximadamente  $1,7 \cdot 10^{14}$  kW, resultado de multiplicar la constante solar<sup>92</sup> por la sección transversal del planeta. Esta potencia es equivalente a 170 millones de reactores nucleares de 1000 MW, o lo que es lo mismo, y teniendo en cuenta datos de 2013<sup>93</sup>, más de 10.000 veces el consumo energético mundial.

Actualmente existen numerosas tecnologías que hacen uso de aprovechamiento solar para producir energía eléctrica. Básicamente se pueden diferenciar a los sistemas basados en el efecto fotoeléctrico, es decir la energía solar fotovoltaica y los sistemas basados en ciclos termodinámicos, es decir la energía solar térmica de alta entalpía, también llamada energía termosolar o energía solar termoelectrica. Será en este aprovechamiento solar en el que se basará toda la presente tesis doctoral.

Así pues, una central solar termoelectrica es una instalación de producción de electricidad a partir de radiación solar directa. La radiación solar se transforma en energía térmica de alta temperatura para, posteriormente, transformarse en electricidad.

---

<sup>90</sup> Jacobs, D. (2016). *Renewable energy policy convergence in the EU: the evolution of feed-in tariffs in Germany, Spain and France*. Routledge.

<sup>91</sup> Parlamento Europeo. (2016). Parlamento Europeo. Accedido el 25 junio 2016, desde <http://www.europarl.europa.eu/portal/es>

<sup>92</sup> Johnson, F. S. (1954). *The solar constant*. Journal of Meteorology, 11(6), 431-439.

<sup>93</sup> Van der Hoeven, M. (2013). *World Energy Outlook 2013*. International Energy Agency: Tokyo, Japan.



Para alcanzar las temperaturas requeridas, la radiación directa se concentra en sistemas basados en lentes y espejos. Posteriormente, la transformación de la energía térmica a eléctrica se basa en ciclos termodinámicos.

Las centrales termoelectricas están compuestas por tres subsistemas. Éstos son el sistema de captación, el bloque de producción de calor y el bloque de generación de electricidad. Además, algunos sistemas termoelectricos incluyen un cuarto bloque, el de almacenamiento energético. Un esquema simplificado de esta estructura se muestra en la siguiente figura.

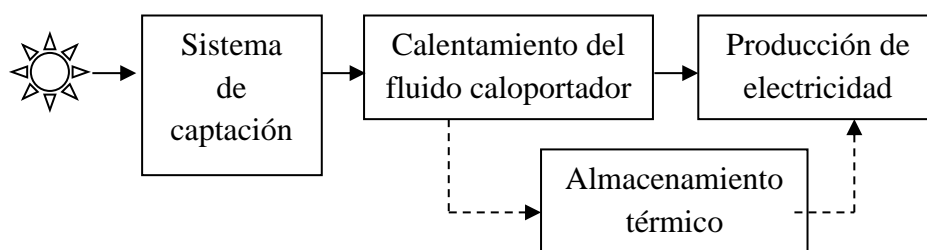


Figura 13. Esquema simplificado de una central termoelectrica, con los diferentes subsistemas que la conforman. Alguno de ellos, como el de almacenamiento térmico, puede no estar presente en todas las instalaciones. Elaboración propia.

El bloque de captación está compuesto por un receptor óptico, que normalmente es un conjunto de espejos que concentran la luz solar sobre el bloque de producción de calor. En este subsistema, se produce el calentamiento de un fluido, que recibe la energía del sol y aumenta su temperatura pasando el calor al subsistema de producción eléctrica, el cual transforma la energía calorífica en electricidad, que es vertida a las redes de suministro para su distribución a los puntos de consumo.

La radiación es interceptada (nótese que únicamente la radiación solar directa es susceptible de ser concentrada), concentrada y enviada a un receptor por el que circula un fluido que aumenta su temperatura. Este calor se traspasa a una máquina térmica gracias a la cual se produce electricidad, esto último es el denominado bloque de producción eléctrica.

Además de lo anterior, algunas instalaciones tienen capacidad para almacenar energía, en forma de calor, para mantener la producción eléctrica en ausencia de sol, permitiendo

adaptar el ritmo de producción energética al de la demanda, garantizando el suministro en el preciso momento en que se necesita.

Para concentrar la radiación se hace uso de las propiedades ópticas de la parábola, que tiene la capacidad de reflejar sobre el foco los rayos paralelos a su eje.

Existen, fundamentalmente, cuatro tipos de centrales termoelectricas, que se corresponden con cuatro enfoques diferentes de aprovechamiento de un mismo recurso, la energía del sol, para un mismo fin, la producción de electricidad. Se trata de las plantas de concentradores cilindro-parabólicos (CCP), de torre o receptor central, de disco parabólico Stirling y concentración Fresnel.

En función de la arquitectura de la planta se pueden conseguir concentraciones sobre un eje lineal (foco lineal). O bien, puntuales ya que al hacer girar una parábola alrededor de su eje, se obtiene un paraboloide de revolución (foco puntual). Y en función de ello se pueden distinguir los cuatro tipos fundamentales de centrales termosolares:

- Torre central: Concentración de la radiación puntual.
- Disco Stirling: Concentración de la radiación puntual.
- Cilindros parabólicos: Concentración de la radiación lineal.
- Fresnel: Concentración de la radiación lineal.

### 3.4. Clasificación de las tecnologías termosolares.

Las plantas de energía solar termoeléctrica de concentración son instalaciones importantes a tener en cuenta en el abastecimiento energético mundial de las siguientes décadas. Cuatro son las tecnologías ampliamente testadas tanto en piloto como en marcha<sup>94</sup>.

Actualmente estas tecnologías son capaces de adaptarse a producción de electricidad tanto en conexión a red como para sistemas aislados<sup>95</sup>.

#### 3.4.1. Torre central.

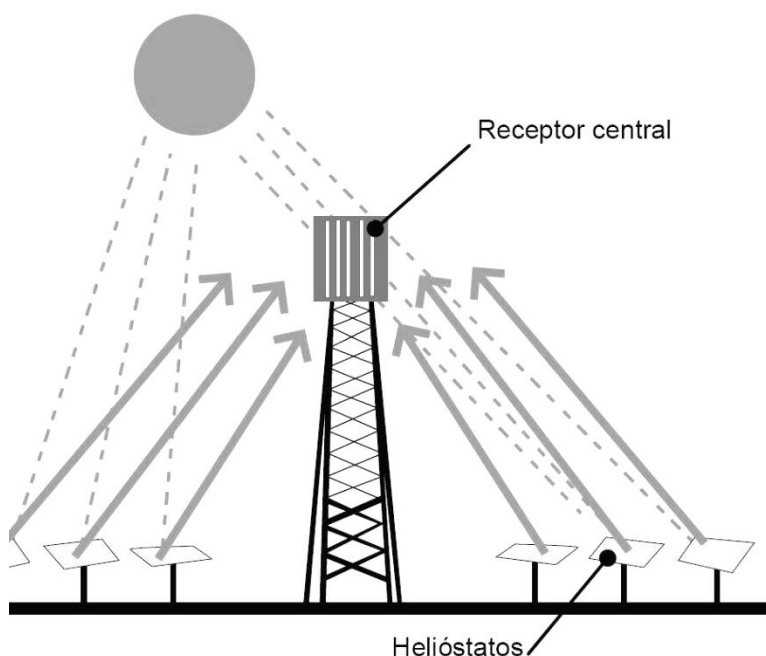


Figura 14. Esquema de un sistema solar térmico del tipo torre central. Un conjunto de espejos con capacidad para orientarse hacia el sol (helióstatos) dirigen la radiación solar hacia lo alto de una gran torre, en la que se sitúa el receptor con el fluido a calentar. Fuente: Brakmann, G., & Raiener, A. (2004)<sup>96</sup>.

En las instalaciones de torre central, es la ubicación del receptor en lo alto de una gran torre la que da nombre a la tecnología. El sistema de captación está constituido por un

---

<sup>94</sup> Mills, D. (2004). *Advances in solar thermal electricity technology*. Solar Energy, 76(1), 19-31.

<sup>95</sup> Romero, M., & González-Aguilar, J. (2011). *Solar thermal power plants: from endangered species to bulk power production in sun-belt regions*. Energy & Power Generation Handbook, KR Rao, ed., ASME, New York.

<sup>96</sup> Brakmann, G., & Raiener, A. (2004). *Energía solar termoeléctrica. 2020 pasos firmes contra el cambio climático*. Greenpeace, Amsterdam.

conjunto de grandes espejos denominados heliostatos que se orientan hacia la posición del sol. Todos ellos dirigen la luz colectada hacia el receptor el cual absorbe la radiación solar concentrada reflejada por los heliostatos y la convierte en energía térmica. Esta energía se utiliza para producir vapor de alta presión en una caldera. Posteriormente, dicho vapor se expande en una turbina de vapor, generando electricidad.

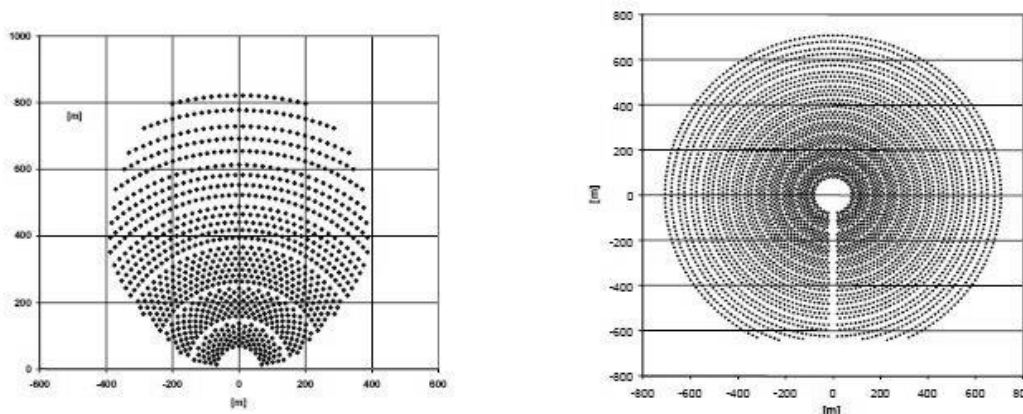


Figura 15. Disposiciones más habituales de los heliostatos. Izq. Campo N-S. Dcha. Campo Circundante.  
*Fuente:* Simulación en SAM.

Las torres centrales tienen una potencia típica en el rango entre 10 y 200 MW. El factor de concentración es elevado permitiendo temperaturas de funcionamiento superiores a  $800^{\circ}\text{C}$ <sup>97</sup>. Estas altas temperaturas permiten aumentar el rendimiento, siendo técnicamente viable alcanzar valores instantáneos cercanos al 23% y de hasta el 20% de promedio anual.

El factor de capacidad anual de estas plantas puede alcanzar el 70 %, mediante el uso de sistemas de almacenamiento térmico. De esta manera, es posible superar las 4.500 horas equivalentes de funcionamiento al año. En las plantas menos prestacionales, el factor de capacidad puede ser mucho menor, en el entorno del 20 %<sup>98</sup>.

<sup>97</sup> FENERCOM,. (2012). *Guía técnica de la energía solar termoeléctrica*. Madrid.

<sup>98</sup> Romero-Alvarez, M., & Zarza, E. (2007). Concentrating solar thermal power. Handbook of energy efficiency and renewable energy, 21-1.

### 3.4.2. Concentración lineal Fresnel.

La tecnología de concentración lineal Fresnel se compone de largas filas paralelas de espejos de pequeña anchura que giran alrededor de su eje longitudinal. Estos espejos concentran la radiación solar en un receptor central fijo suspendido a cierta altura sobre el plano de los espejos. El receptor consiste en un tubo por el que circula el fluido caloportador y que debido a la energía que incide sobre él se transfiere al ciclo de potencia y transforma el agua en vapor de alta presión. Posteriormente, dicho vapor se expande en una turbina de vapor, generando electricidad.

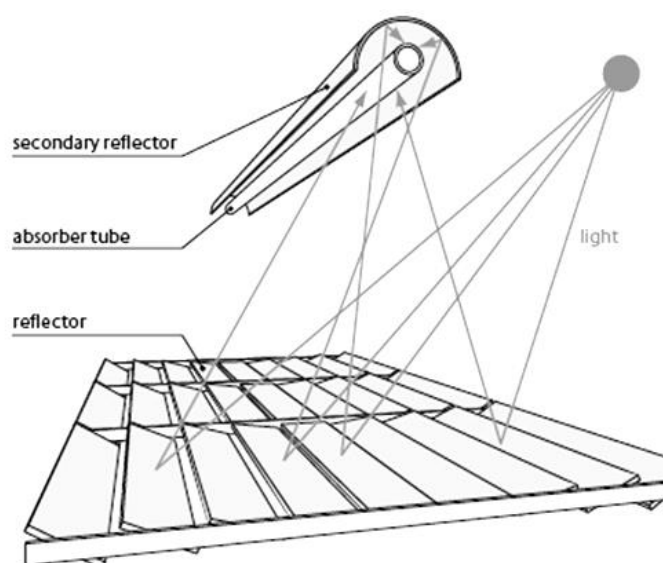


Figura 16. Esquema de funcionamiento de los colectores Fresnel. Fuente: Brakmann, G., & Raiener, A. (2004)<sup>99</sup>.

### 3.4.3. Disco parabólico Stirling.

Los sistemas de disco parabólico utilizan concentradores con esta simetría para coleccionar la radiación solar y concentrarla en el foco de la parábola. En ese punto se sitúa el receptor de la luz, que es un motor de combustión del tipo 'Stirling'.

---

<sup>99</sup> Brakmann, G., & Raiener, A. (2004). *Energía solar termoeléctrica. 2020 pasos firmes contra el cambio climático*. Greenpeace, Amsterdam.

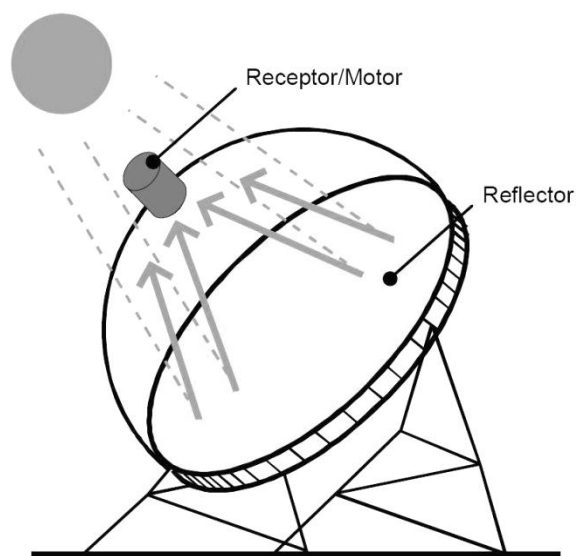


Figura 17. Esquema de un sistema solar térmico del tipo disco parabólico. Un espejo con forma de disco parabólico concentra la radiación solar sobre un receptor situado en el foco de la parábola, calentando el fluido térmico. Fuente: Brakmann, G., & Raiener, A. (2004)<sup>100</sup>.

Los discos parabólicos utilizan seguimiento en dos ejes, siendo posible alcanzar niveles de concentración de hasta 4.000 soles. Son sistemas muy modulares, con potencias unitarias entre 5 y unos 30 kW. Por ello, tienen gran potencial para instalaciones aisladas de la red, donde podrían competir con los sistemas fotovoltaicos o con las pequeñas instalaciones eólicas.

Las elevadas concentraciones de los discos parabólicos permiten alcanzar temperaturas de funcionamiento de hasta 800 °C, con las que es posible obtener rendimientos muy altos. De hecho, se trata de los sistemas solares de generación eléctrica que han demostrado mayor eficiencia, siendo posible alcanzar valores máximos cercanos al 30 % y promedios anuales de hasta un 25 %<sup>101</sup>.

La superficie reflectante de los concentradores puede ser de vidrio (espejos) o de una lámina delgada metalizada, fijada a una estructura de fibra de vidrio. Estos reflectores concentran la radiación sobre receptores que contienen un gas, normalmente helio, hidrógeno o aire. La expansión del gas produce el desplazamiento de un pistón, que mueve un alternador integrado en el mismo foco, para generar la electricidad.

---

<sup>100</sup> Brakmann, G., & Raiener, A. (2004). *Energía solar termoeléctrica. 2020 pasos firmes contra el cambio climático*. Greenpeace, Amsterdam.

<sup>101</sup> Romero-Alvarez, M., & Zarza, E. (2007). *Concentrating solar thermal power*. Handbook of energy efficiency and renewable energy, 21-1.

La utilización de motores del tipo Stirling en estas instalaciones se debe a su alto rendimiento termodinámico. Y es que, a las temperaturas alcanzadas en los discos parabólicos, es posible llegar a eficiencias en el motor de entre el 30 y el 40 %. Además, al tratarse de motores de combustión externa, el aporte energético se realiza desde el exterior, mediante la luz solar recogida por el disco parabólico.

#### 3.4.4. Centrales Cilindro parabólicas (CCP)

La presente tesis doctoral está centrada en esta tecnología en concreto, por lo que a lo largo de este capítulo se podrá apreciar una mayor profundidad del estudio de esta tecnología.

Los CCP son captadores solares de concentración que transforman la radiación solar directa en energía térmica, calentando un fluido de trabajo hasta temperaturas del orden de los 400°C, con una eficiencia del 60% - 70%. Debido a la elevada temperatura de trabajo que pueden alcanzar, los CCP son idóneos para alimentar térmicamente a una gran diversidad de procesos industriales (producción de acetona, industria láctea, procesado de residuos, producción de electricidad mediante ciclos Rankine, etc.), reemplazando de este modo a los combustibles fósiles tradicionales<sup>102</sup>.

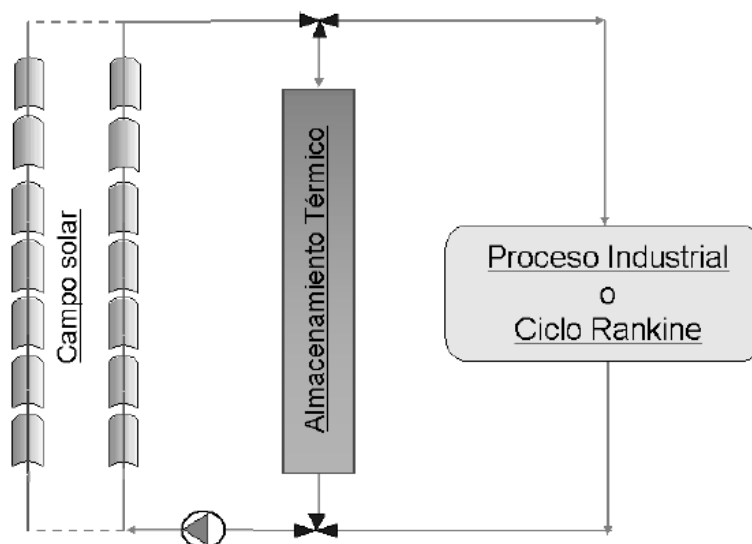


Figura 18. Esquema simplificado de un sistema CCP, con almacenamiento térmico en un único. Fuente.

CSIC. Eduardo Zarza.

---

<sup>102</sup> Kutscher, C. F., Davenport, R. L., Dougherty, D. A., Gee, R. C., Masterson, P. M., & May, E. K. (1982). *Design approaches for solar industrial process-heat systems: nontracking and line-focus collector technologies* (No. SERI/TR-253-1356). Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA).

De los cuatro sistemas solares de concentración que existen actualmente (receptor central, discos parabólicos, concentradores lineales Fresnel y captadores cilindro-parabólicos), es precisamente la tecnología de los captadores cilindro-parabólicos la que se encuentra hoy en día más desarrollada comercialmente, gracias a la experiencia de las plantas comerciales SEGS y de las plantas recientemente instaladas en España desde 2007.

En las denominadas centrales de colectores cilindro-parabólicos (CCP) los espejos están dispuestos formando hileras lineales en forma de parábola.

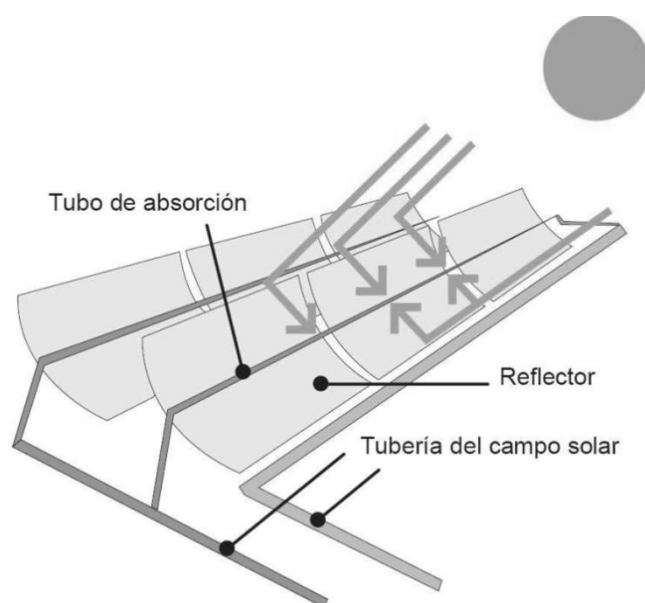


Figura 19. Esquema de un sistema solar térmico del tipo CCP. Un espejo con simetría cilíndrica concentra la radiación solar sobre un tubo absorbedor, por el que pasa el fluido caloportador. Fuente: Brakmann, G., & Raiener, A. (2004).

Los sistemas de colectores cilindro-parabólicos están compuestos por un receptor de luz con simetría cilíndrica, que concentra la radiación en el foco de una parábola, donde se encuentra el colector por el que circula el fluido de transferencia de calor (Heat Transfer Fluid, HTF), normalmente aceite térmico. Es en éste donde se convierte la energía de la luz solar en energía calorífica, que se emplea en elevar la temperatura del citado fluido. Posteriormente, el calor del HTF se transfiere a un circuito de producción de vapor para mover una turbina y generar electricidad.



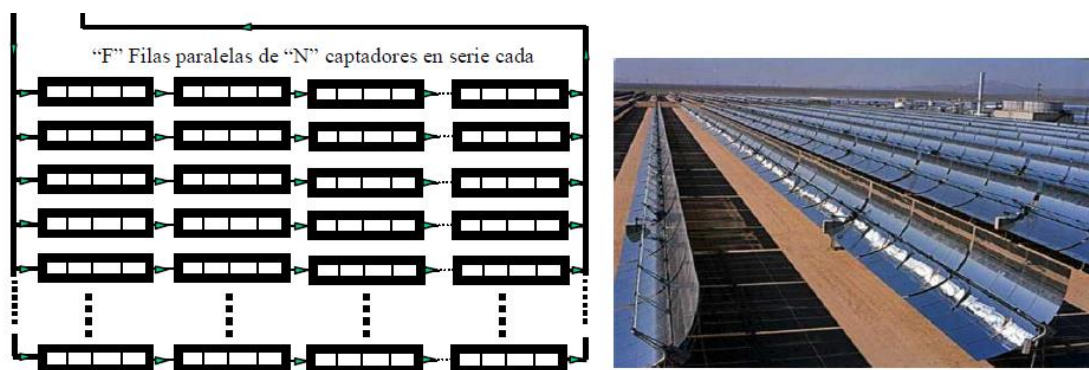


Figura 20. Representación esquemática y vista fotográfica de un campo de captadores. Fuente: CSIC. Eduardo Zarza.

Un campo típico de CCP (Figura 20) está compuesto por un número de filas paralelas de captadores cilindro-parabólicos. Cada fila, a su vez, está compuesta por varios captadores conectados en serie de manera que el fluido de trabajo que circula por los tubos absorbedores es calentado conforme pasa desde la entrada a la salida de cada fila.

Los captadores cilindro-parabólicos están generalmente instalados en el campo de captadores de forma que sus ejes de rotación están orientados Norte-Sur o Este-Oeste. Sin embargo, cualquier orientación es adecuada, siempre que la orientación sea la misma para todas las filas. Si la orientación de las filas no fuera la misma, la radiación disponible sobre ellas variaría mucho de unas filas a otras, por tener un diferente ángulo de incidencia, y ello dificulta seriamente la controlabilidad de la temperatura del fluido de trabajo a la salida del campo de captadores.

La elección del tipo de orientación de los captadores depende de diversos factores, si se desea si se desea producir más en verano que en invierno, la orientación adecuada es la Norte-Sur. Si interesa más producir una mayor cantidad de energía en el año, aunque en invierno se produzca bastante menos que en verano la orientación correcta es Norte-Sur. Si se desea que el campo solar suministre una potencia térmica similar en verano y en invierno, la orientación adecuada es Este-Oeste<sup>103</sup>.

<sup>103</sup> Romero-Alvarez, M., & Zarza, E. (2007). Concentrating solar thermal power. *Handbook of energy efficiency and renewable energy*, 21-1.

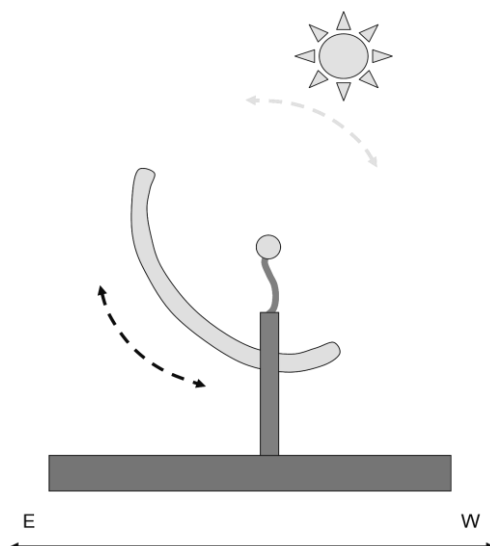


Figura 21. vista lateral de un concentrador cilindro-parabólico, con seguimiento del sol en un solo eje. La orientación del eje es norte-sur, y el seguimiento se produce en la dirección del movimiento del sol, este-oeste.

Los CCPs disponen de dispositivos de seguimiento o tracking, de un solo eje en este caso (estas instalaciones sólo pueden aprovechar la componente directa de la radiación solar). En particular, el eje del cilindro receptor se encuentra orientado en la dirección norte-sur, y el seguimiento del sol se realiza en la dirección este-oeste (o seguimiento acimutal). Para ello, el concentrador rota alrededor de su eje de simetría, paralelo al tubo colector.

En la práctica, la potencia nominal de una planta CCPs está entre unos pocos megavatios (20-30 MW) y hasta unos 300 MW. Sin embargo, realmente es posible realizar proyectos con casi cualquier valor en este rango, dado la elevada modularidad de esta tecnología.

El factor de capacidad de una planta CCPs puede llegar a alcanzar el 50 %, estando en la práctica por encima del 20 %. La eficiencia a pleno rendimiento es del 20 %, típicamente, y el rendimiento medio anual está comprendido entre el 11 y el 16 %<sup>104</sup>.

El tipo de fluido de trabajo que se utiliza en los CCPs depende de la temperatura de funcionamiento del sistema. En las primeras plantas si la temperatura de diseño era

---

<sup>104</sup> Romero-Alvarez, M., & Zarza, E. (2007). *Concentrating solar thermal power*. Handbook of energy efficiency and renewable energy, 21-1.

moderada ( $<200^{\circ}\text{C}$ ), se utilizaba agua desmineralizada o Etilenglicol como fluido de trabajo. Sin embargo, en aplicaciones desarrolladas para funcionar a temperaturas más altas (entre  $200$  y  $450^{\circ}\text{C}$ ), se suelen utilizar aceites sintéticos, actualmente se está estudiando el uso de sales fundidas como fluido de trabajo.

Dependerá en gran medida de la aplicación. Los CCP han sido usados tanto para generación de vapor en procesos industriales como para producción de electricidad. Las capacidades técnicas permiten el uso de CCP para producción de electricidad, así pues se podría decir que el uso de esta tecnología para procesos industriales sería una forma de desaprovechamiento de sus capacidades máximas o bien, parte de la investigación inicial de la técnica<sup>105</sup>.

A continuación se presentan unas figuras con las configuraciones más típicas en la tecnología CCP.

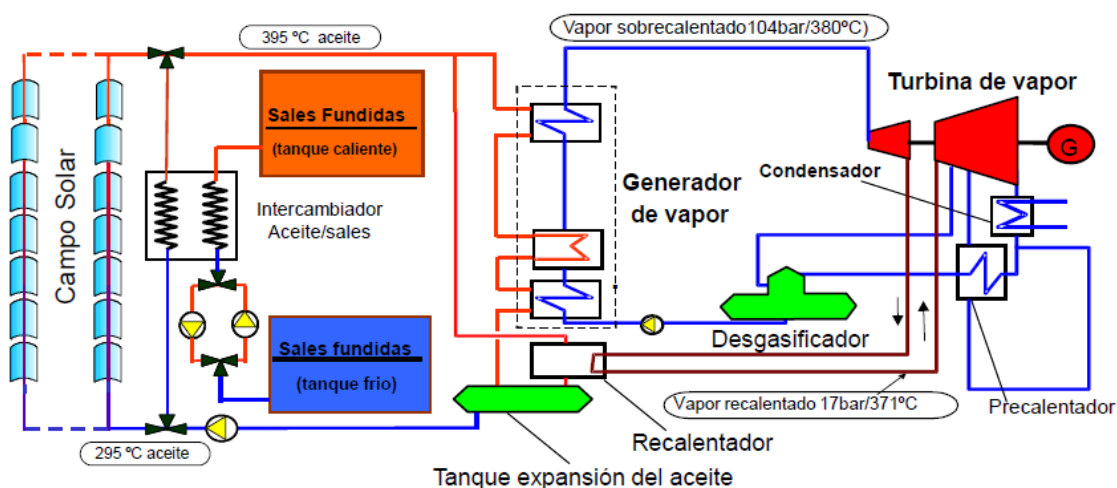


Figura 22. Producción de electricidad con almacenamiento térmico, con aceite térmico como fluido de trabajo. Tecnología más implantada comercialmente. Fuente. CSIC. Eduardo Zarza.

En una planta de este tipo, el aceite térmico es calentado hasta una temperatura en torno los  $350^{\circ}\text{C}$  en el campo solar, siendo enviado después o bien a un sistema de almacenamiento térmico (Figura 22), o directamente a un intercambiador de calor (Figura 23) donde se genera el vapor que necesita el bloque de potencia para producir la electricidad. El vapor producido en el generador de vapor se expande en una turbina de vapor acoplada al generador eléctrico, que es el que produce la electricidad propiamente

<sup>105</sup> Müller-Steinhagen, H. (2013). *Concentrating solar thermal power*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 371(1996), 20110433.

dicha. La turbina de vapor cuenta con dos etapas: una de alta presión y otra de baja presión.

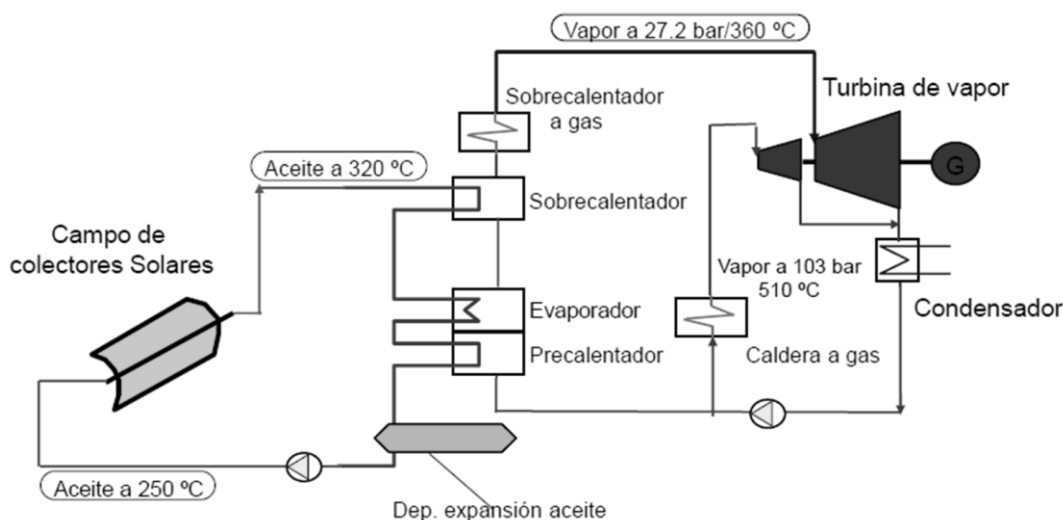


Figura 23. Producción de electricidad sin almacenamiento térmico, con aceite térmico como fluido de trabajo. Fuente: CSIC. Eduardo Zarza.

Tras expandirse en la etapa de alta presión, el vapor pasa a un recalentador que sube su temperatura hasta los 271°C / 17 bar. Posteriormente, el vapor se expande en el cuerpo de baja presión de la turbina. Con posterioridad a su expansión en la turbina, el vapor es condensado y pasa al desgasificador, donde se elimina el oxígeno que pudiera ir disuelto en el condensado. Tras el desgasificador, el agua pasa al generador de vapor para comenzar de nuevo el ciclo.

El esquema del bloque de potencia de una central termosolar con CCP es idéntico al de una central eléctrica convencional, con la diferencia de que la energía térmica consumida por el generador de vapor (caldera) es aportada en este caso por un campo de captadores solares.

La construcción de un sistema de almacenamiento térmico en este tipo de plantas es optativa del propietario. Si se dispone de un sistema de almacenamiento térmico, será posible que la central solar suministre energía eléctrica cuando no hay radiación solar directa o esta resulta insuficiente. En este caso, el campo solar debe estar sobredimensionado para que durante las horas de Sol pueda alimentar no solamente el generador de vapor, sino también cargar el sistema de almacenamiento térmico. La energía térmica así guardada en el sistema de almacenamiento puede ser posteriormente

usada para alimentar el generador de vapor durante periodos nubosos o después de la puesta de Sol. Aunque hay varias opciones disponibles, el sistema de almacenamiento que se considera actualmente como mejor opción para centrales termosolares con captadores cilindro-parabólicos en las que se desea una importante capacidad de almacenamiento, consiste en sales fundidas. En este caso, una mezcla eutéctica de nitratos de sodio y potasio se almacena en estado líquido en dos tanques (uno frío y otro caliente). Es evidente que la temperatura más baja en un sistema de almacenamiento de este tipo debe ser siempre superior a la temperatura de fusión de las sales (150°C - 250°C), ya que en caso contrario se solidificarían y bloquearían el sistema de tuberías. La Figura 22 muestra el esquema simplificado de una central termosolar con un sistema de almacenamiento de este tipo. Puesto que en este caso el fluido de trabajo en los captadores solares (aceite) es diferente del medio de almacenamiento (sales fundidas) se necesita un intercambiador de calor entre el circuito de aceite y el sistema de almacenamiento.

Hoy en día, debido a la gran capacidad de almacenamiento que se necesita, el sistema de almacenamiento térmico que se utiliza en estas plantas es a base de sales fundidas. Este tipo de plantas puede tener también una caldera auxiliar de gas que le permite calentar el aceite cuando no hay radiación solar suficiente (por la noche o durante periodos de nubes).

### **3.4.5. Generación directa de vapor.**

Existe una tecnología termoeléctrica en investigación que emplea agua como fluido de trabajo en lugar del aceite térmico. En ella, el campo solar está compuesto por colectores cilindro-parabólicos adaptados, que calientan el agua directamente para generar vapor. El vapor, como en las plantas CCP convencionales, alimenta la turbina para mover un generador y producir la electricidad.

Esta tecnología se denomina de Generación Directa de Vapor (o DSG, por sus siglas en inglés Direct Steam Generation), y existe un prototipo en la Plataforma Solar de Almería<sup>106</sup>. Sin embargo, no hay en este momento plantas comerciales, dado que no se

---

<sup>106</sup> Zarza, E. (2007). *Overview on direct steam generation (DSG) and experience at the Plataforma Solar de Almeria (PSA)*. CIEMAT presentation to the National Renewable Energy Laboratory, [http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/2007/zarza\\_d\\_sg\\_overview.pdf](http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/2007/zarza_d_sg_overview.pdf).

ha alcanzado la madurez necesaria como para hacer posible instalaciones lo suficientemente fiables.

La idea de las DSG es evitar utilizar aceites térmicos, que son fluidos tóxicos de difícil gestión medioambiental que pueden dar lugar a problemas de contaminación en caso de fugas. Por ello, su eliminación también aumentaría la seguridad de las plantas. Además, éstas serían más simples, dado que se podría suprimir el intercambiador de calor, lo cual permitiría a su vez un mayor rendimiento.

Los principales inconvenientes de las DSG son la mayor presión de trabajo requerida, de unos 100 bares a 400 ° C, que hace que sea imprescindible utilizar sistemas hidráulicos más robustos (válvulas, bombas, tubos, etc.), y el mayor peligro de congelación en el campo de captación con respecto a los sistemas con aceites térmicos.

En cuanto a las ventajas, además de las ya citadas, cabe destacar el mayor potencial de eficiencia de las plantas, puesto que sería posible alcanzar mayores temperaturas en el ciclo de vapor. Esto tendría como consecuencia un menor tamaño del campo solar, a igualdad de potencia. Las instalaciones también serían más sencillas (sin intercambiadores) y con menor mantenimiento. Por todo ello, el potencial ahorro de costes es grande.

El funcionamiento anteriormente descrito se puede hacer extensivo a la tecnología Fresnel.

En el caso de la tecnología de disco Stirling, como se ha comentado anteriormente, el fluido de trabajo es un gas, habitualmente helio, que se comprime y expande por efecto del calor, accionando un motor.

En el caso de las tecnologías de torre central, se han investigado varios medios de transferencia de calor del receptor central, como agua/vapor, sodio líquido, sal fundida y aire ambiente.

El sistema de almacenamiento de sal fundida permite que se recoja energía solar durante el día y se distribuya como energía eléctrica de alto valor por la noche o cuando lo requiera la compañía eléctrica.

### 3.4.5.1. Energía útil de un colector CCP.

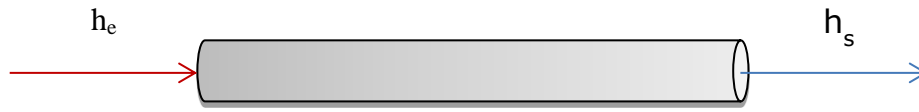


Figura 24. Entalpía de entrada y salida del fluido de trabajo del colector térmico. *Fuente:* Elaboración propia.

La entalpía de un fluido es una propiedad relacionada con energía contenida él por cantidad de masa, está asociada a su energía interna y a su presión; es decir, se trata de la cantidad de energía que un fluido podría cambiar con su entorno. La entalpía se mide en J/kg.

Así pues, conocida la entalpía del fluido de trabajo a la entrada y la salida (que dependerá de sus condiciones de presión, temperatura, etc.) se podrá conocer la energía intercambiada.

Para conocer las condiciones de potencia térmica no se tendrá más que multiplicar por el caudal (kg/s). Es decir,

$$P_{\text{útil}} = Q(h_s - h_e)$$

Ecuación 1

El incremento de entalpía que el fluido de trabajo sea capaz de asumir por efecto de la acción del Sol será lo que marque el calor útil aprovechable.

Una manera equivalente de obtener la energía del fluido de trabajo es conocer su calor específico ( $C_p$ , con unidades  $\frac{J}{kg \text{ } ^\circ C}$ ) y el incremento de temperatura que sufre;

$$E = mC_p\Delta T.$$

Ecuación 2

### 3.4.6. Componentes.

A continuación se presenta una tabla resumen con los componentes principales de las cuatro tecnologías estudiadas. Posteriormente se definirán los más relevantes con mayor detalle.

	CCP	TORRE	FRESNEL	STIRLING
<b>Sistema de captación y concentración</b>	Espejos con cilindro-parabólica.	Campo de heliostatos.	Largas filas paralelas de espejos de pequeña anchura.	Disco con simetría de paraboloides de revolución
<b>Receptor, calentamiento del fluido</b>	Tubo colector por el que circula HTF	Puntual, en lo alto de la torre. Distintas tipologías.	Tubo por el que circula fluido caloportador.	Motor Stirling
<b>Transferencia de calor.</b>	Mediante un intercambiador de calor. Se transfiere la energía a un circuito secundario por el que circula agua.	El fluido de transferencia de calor puede ser aire, sales fundidas o directamente agua-vapor.	Directamente radiación concentrada al circuito de producción de vapor.	Directamente radiación concentrada al motor.
<b>Máquina térmica, producción de electricidad</b>	Turbina de vapor. Ciclo Rankine.	Normalmente turbina de vapor. Ciclo Rankine.	Turbina de vapor. Ciclo Rankine.	Motor Stirling

Tabla 4. Relación de tecnologías con sus componentes. Resumen esquemático.



#### **3.4.6.1. Reflectores .**

Como se comentó anteriormente, los reflectores están constituidos por espejos curvados en forma de parábola (CCP, Stirling), o planos (Fresnel, torre) , que concentran la luz solar en su línea (o punto) focal, sobre el tubo (o punto) absorbedor.

El espejo está formado por una superficie de partículas metálicas, de aluminio o plata, que es depositada sobre un soporte con la simetría adecuada. Dicho soporte puede ser de vidrio grueso o de metal.

El precio de los reflectores es elevado, fundamentalmente por la ausencia de economías de escala y por el limitado número de fabricantes que los desarrollan. Se están buscando en la actualidad otros diseños alternativos, que permitan reducir el coste. Entre los más desarrollados, se encuentran las láminas reflectantes (películas con elevada reflectividad que se moldean insitu sobre el soporte parabólico) y los espejos de vidrio delgado.

La eficiencia de los espejos (definida como la potencia óptica proyectada sobre el tubo colector dividida por la potencia de la radiación directa que incide sobre el espejo) depende fuertemente de las tolerancias de fabricación de la superficie reflectora y de la reflectividad de ésta. Además, otros efectos, como la precisión del sistema de seguimiento o la regularidad en la limpieza de los espejos pueden tener una influencia notable. En cualquier caso, existen diseños comerciales que alcanzan el 90 % de eficiencia.

Por ejemplo, se ve, a continuación, cómo el rendimiento óptico de un CCP estará determinado por los cuatro factores representados en la Figura 25.

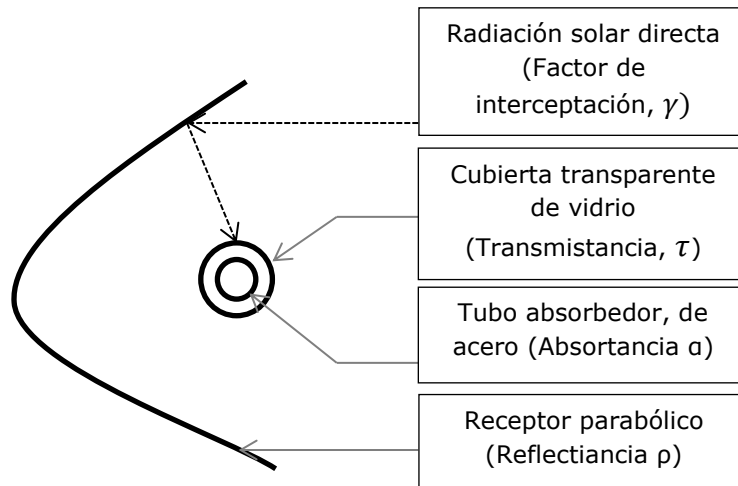


Figura 25. Esquema con los factores que intervienen en el rendimiento óptico del captador. *Fuente:* Elaboración propia.

La geometría del captador no es capaz de captar toda la radiación que incide, así pues se introduce el factor de interceptación,  $\gamma$ , que ronda el 95%.

En función de la transparencia del vidrio pasará a través de él más o menos radiación. Así pues, los valores de transmitancia suelen rondar el 90-95%

Solo una parte de la radiación incidente en el absorbedor es capaz de ser asumida, así pues, la absortancia ronda el 90-95%

Los espejos no siempre están absolutamente limpios, la radiación incidente que es reflejada por ellos cuando se encuentran sin nada de suciedad está en un rango comprendido entre el 90-95%.

Por todo lo anterior, se define el rendimiento óptico del CCP como, con valores típicos cercanos al 80%:

$$\eta_{opt} = \gamma \tau \alpha \rho$$

Ecuación 3

### 3.4.6.2. El absorbedor .

Es el elemento en el que se concentra la radiación solar, que calienta el fluido caloportador que lo recorre en su interior, elevando su temperatura.



Figura 26. Esquema del tubo absorbedor de un sistema CCP. Fuente: Fotografía de CSP Today con indicativos propios.

En el caso de los CCP, está formado por dos tubos concéntricos, uno interior metálico, el que contiene el fluido, y uno exterior de vidrio, que lo protege y realiza funciones de aislamiento térmico.

El tubo metálico interior por el que circula el fluido está recubierto de una superficie con tratamiento selectivo, que le confiere una gran absorptividad de la luz solar y una reducida emisividad. Esto permite reducir las pérdidas por reflexión y por reemisión de la luz, maximizando la eficiencia.

El tubo exterior es de vidrio, que proporciona protección al tubo interior frente a las influencias de la intemperie. Además, evita pérdidas caloríficas, al confinar la radiación infrarroja procedente del absorbedor. Con el mismo fin, de evitar al máximo las pérdidas de energía calorífica, entre los dos tubos concéntricos se realiza el vacío.

La soldadura entre el tubo de vidrio y las partes metálicas es uno de los puntos críticos de todo el dispositivo. El diferente coeficiente de dilatación entre la soldadura y el resto

de materiales da lugar a que, a las elevadas temperaturas de funcionamiento, aparezcan tensiones mecánicas inducidas, que pueden provocar la rotura del metal de soldadura.

En el caso de las plantas de torre central, el receptor se sitúa en lo alto de la torre. Distintos tipos de receptores dependiendo de sus características geométricas y operativas con distintos tipos de fluidos de transferencia de calor. Se pueden llegar a alcanzar temperaturas de 1500°C.



Figura 27. Receptor tubular externo cilíndrico. *Fuente:* Gemasolar y Romero-Alvarez Manuel, Zarza Eduardo. Concentrating Solar Thermal Power. En, Frank Kreith and D. Yogi Goswami (ed.). *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007. Capítulo 21.

Normalmente, las plantas comerciales producen directamente vapor en el receptor para su uso en una turbina de vapor. De todas formas, las centrales de torre podrían alcanzar temperaturas superiores a los 1000°C lo que permitiría calentar gas para su uso en una turbina. Esto abre la posibilidad de usar turbinas de gas.

En el caso de las plantas Frensel el receptor consiste en un tubo por el que circula agua que puede llegar a trabajar en torno a los 300°C.

En el caso de la tecnología de disco Stirling, aunque se han realizado desarrollos con microturbinas pero lo más extendido es el uso de un motor Stirling como receptor. En el motor se encuentra un gas que sigue sucesivos ciclos de compresión y expansión.

### 3.5. Almacenamiento térmico en las centrales termosolares.

La fácil integración del almacenamiento térmico de energía (TES, por sus siglas en inglés Thermal Energy Storage) hace a la energía solar de concentración gestionable y única con respecto a otras energías renovables.

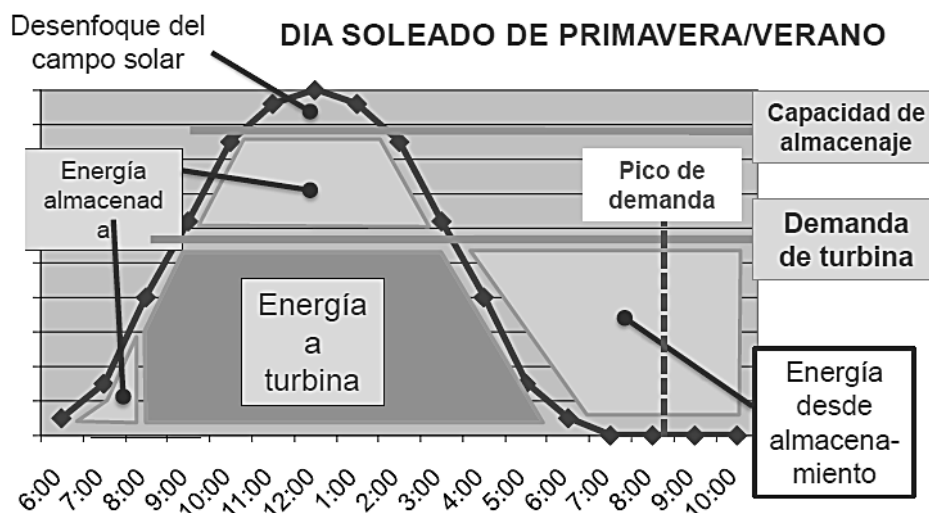


Figura 28. Ejemplo real de curva de almacenamiento en un día soleado de primavera/verano. *Fuente:* Juan Ignacio Burgaleta. Gemasolar, central termosolar totalmente gestionable. Torresol Energy. Casa Encendida. Junio 2013<sup>107</sup>

Una gran ventaja de los sistemas termoelectricos es que es posible almacenar energía para su consumo en los momentos en que no hay sol. Esto se puede conseguir utilizando grandes tanques en los que se acumula un fluido a alta temperatura (normalmente, algún tipo de sales fundidas o directamente vapor), manteniéndolo en estas condiciones hasta los momentos en que se requiere la electricidad. Es entonces cuando se produce o se utiliza el vapor necesario para la generación.

Y es que el almacenamiento de calor se puede realizar de manera eficiente. Las pérdidas en el proceso son muy reducidas, existiendo sistemas que han demostrado un rendimiento superior al 99 %<sup>108</sup>.

El almacenamiento térmico de calor de alta eficiencia ofrece un paso intermedio para la generación de electricidad. Dependiendo del tamaño del sistema del TES, la planta

<sup>107</sup> Burgaleta, J. (2013). *Gemasolar, central termosolar totalmente gestionable*. Torresol Energy.. Presentation. Casa Encendida Madrid.

<sup>108</sup> Díaz Villar, P., Peña Capilla, R., & Romón Salinas, C. (2014). *Energía solar térmica y pasiva*. [Madrid]: Ed. Roble.

podrá ser capaz de mitigar las fluctuaciones de carga y cambiar o ampliar el suministro de energía. La energía termosolar con almacenamiento térmico presenta una ventaja económica por poder suministrar electricidad en los momentos de mayor necesidad que por lo general tienen la tarifa más alta<sup>109</sup>.

Una de las principales barreras de la adopción generalizada de la tecnología CSP es el alto coste de la electricidad solar. Se espera reducir en un 50-60% el coste de generación por un lado a través de la mejora de la técnica y por otro en la ampliación del almacenamiento<sup>110</sup>.

De la capacidad mundial instalada, aproximadamente la mitad de las instalaciones poseen almacenamiento térmico. La madurez alcanzada estos últimos años en el almacenamiento de sales fundidas ha hecho que del total de plantas que actualmente se encuentra en construcción, el 80% lleven almacenamiento. Este porcentaje aumenta en las centrales de torre y CCP hasta el 88%<sup>111</sup>.

Para una capacidad de almacenamiento dada, la cantidad de sal necesaria para un sistema de almacenamiento en plantas de torre es aproximadamente un tercio de la necesaria en las plantas cilindro-parabólicas ya que el sistema de torre puede alcanzar temperaturas más altas.

Aunque que la tecnología de almacenamiento térmico más común utilizado en las plantas Fresnel lineales es de poco tiempo (1 h aproximadamente) y de almacenamiento de vapor a presión, las sales fundidas aparecen como una solución prometedora para el almacenamiento a largo plazo. Novatec y BASFSE han comenzado a demostrar la tecnología lineal de Fresnel integrada con almacenamiento en sales fundidas directas<sup>112</sup> con un producto comercial, la sal Hitec.

---

<sup>109</sup> Stekli, J., Irwin, L., & Pitchumani, R. (2013). *Technical challenges and opportunities for concentrating solar power with thermal energy storage*. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 5(2), 021011.

<sup>110</sup> Herrmann, U., & Kearney, D. W. (2002). *Survey of thermal energy storage for parabolic trough power plants*. Journal of Solar Energy Engineering, 124(2), 145-152.

<sup>111</sup> Liu, M., Tay, N. S., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., & Bruno, F. (2016). *Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 1411-1432.

<sup>112</sup> Morin, G., Karl, M., Mertins, M., & Selig, M. (2015). *Molten Salt as a Heat Transfer Fluid in a Linear Fresnel Collector—Commercial Application Backed by Demonstration*. Energy Procedia, 69, 689-698

Del mismo modo que se puede afirmar el almacenamiento de energía eléctrica mediante el uso de baterías no ha sido probado que resulte económicamente viable<sup>113</sup>, el almacenamiento térmico resuelve el desajuste de tiempo entre la producción de energía solar y la demanda, lo cual aporta una gran ventaja a la tecnología termosolar de concentración, en este aspecto, frente a otras renovables como la eólica o la fotovoltaica.

Las plantas termosolares que integran un sistema de almacenamiento térmico, pueden operar con diferentes estrategias: mitigando fluctuaciones cortas durante transiciones climáticas, ajustando el período de generación pico a las horas pico de demanda y extendiendo el período de generación cuando el recurso solar no está disponible, lo que mejora el factor de capacidad anual que una planta sistema sin almacenamiento.

El incremento en el periodo de operación que el almacenamiento permite una mayor flexibilidad a la hora de dimensionar el sistema de captación (que no tiene que ser capaz de gestionar toda la energía disponible en las horas de máxima insolación), una mayor flexibilidad en el funcionamiento de la planta (que puede responder a variaciones en la demanda y a diferencias estacionales en la radiación solar disponible) y, en general, la mejora en la eficiencia global del sistema.

### **3.5.1. Tecnologías de almacenamiento térmico de energía.**

Varios hechos tienen que ser considerados al momento de decidir sobre el tipo y el diseño de cualquier sistema de almacenamiento térmico. Una cuestión clave en el diseño de un sistema de almacenamiento de energía térmica es su capacidad térmica. Sin embargo, la selección del sistema adecuado depende de muchas consideraciones de rentabilidad, criterios técnicos y criterios ambientales.

El coste de un sistema TES depende principalmente de los siguientes elementos: el material de almacenamiento en sí mismo, el intercambiador de calor para la carga y descarga del sistema y el coste del espacio y / o recinto para el TES.

---

<sup>113</sup> Divya, K. C., & Østergaard, J. (2009). *Battery energy storage technology for power systems—An overview*. Electric Power Systems Research, 79(4), 511-520.

Desde el punto de vista técnico, los requisitos más importantes son: alta densidad de energía en el material de almacenamiento (capacidad de almacenamiento); buena transferencia de calor entre el fluido de transferencia de calor (HTF) y el medio de almacenamiento (eficiencia); estabilidad mecánica y química del material de almacenamiento (debe ser compatible con variaciones de carga / ciclos de descarga); compatibilidad entre HTF, el intercambiador de calor y / o medio de almacenamiento (de seguridad); reversibilidad completa de un número de carga / descarga ciclos (tiempo de vida); las pérdidas térmicas bajas; y facilidad de control.

Y, por último, los criterios de diseño más importantes desde el punto de vista de la tecnología son: estrategia de operación; carga máxima; temperatura nominal y la caída de entalpía específica de la carga; y la integración en la planta de energía. Todos estos criterios deben tenerse en cuenta al decidir sobre el tipo y diseño de almacenamiento térmico.

#### **3.5.1.1. Almacenamiento de calor sensible.**

En un almacenamiento térmico con calor sensible la energía es almacenada o liberada por ascenso y descenso de la temperatura del medio de almacenamiento, ya sea sólido o líquido. La cantidad de energía almacenada en forma de calor ( $Q$ ), depende de la cantidad de material ( $m$ ), el calor específico del mismo ( $C_p$ ) y el salto térmico ( $\Delta T$ ), todo ello viene determinado por la Ecuación 4. Todos los almacenamientos térmicos de plantas instaladas en la actualidad, son almacenamientos térmicos de calor sensible<sup>114</sup> mediante aceites, sales fundidas, vapor, cerámica y grafito.

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Ecuación 4

---

<sup>114</sup> Liu, M., Tay, N. S., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., & Bruno, F. (2016). *Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 1411-1432.



### 3.5.1.1.1. Sistemas directos y sistemas indirectos.

El almacenamiento de calor sensible se puede mediante sistemas directos e indirectos.

Fluido	Punto de fusión [°C]	Temperatura de funcionamiento máxima [°C]	Coste	
			[\$/kg]	[\$/kWh]
Sal solar binaria	220	600	0,49	5,8 ( $\Delta T = 200K$ )
HiTec	142	593	0,93	10,7 ( $\Delta T = 200K$ )
Therminol	13	393	3,96	57,5 ( $\Delta T = 100K$ )

Tabla 5. Propiedades la sal binaria, sal Hitec y aceite Therminol. Fuente: Cable, R(2003)<sup>115</sup>.

Normalmente los proyectos comerciales de plantas cilindro-parabólicas utilizan como HTF un fluido orgánico, aceite térmico, como por ejemplo, el abordado en esta tesis, Therminol. Éste tiene un límite superior de temperatura de 393 ° C, que establece efectivamente un límite de eficiencia del ciclo Rankine de alrededor del 0,375. La alta presión de vapor del fluido (~ 8 bar a 390 ° C) requiere el uso de otro fluido diferenciado físicamente del primero, y en combinación con un intercambiador de calor, para el sistema de almacenamiento térmico, estos son los denominados sistemas indirectos, que a su vez, ha sido lo más comúnmente utilizado históricamente en plantas cilindro-parabólicas: aceite térmico como fluido de transferencia de calor y, una vez empezaron a implantarse los sistemas de almacenamiento térmico, el uso de sales fundidas para ello.

El aceite sintético era un fluido de trabajo común en plantas cilindro antes de que surgieran las sales fundidas. La sal solar binaria o la sal solar Hitec han desplegado comercialmente en sistemas cilindro-parabólicos y de torre para las aplicaciones directas, estas son aquellas que no requieren una separación física entre el fluido caloportador y el de almacenamiento.

El aceite orgánico se puede sustituir con un fluido inorgánico como es la sal fundida, ya sea binaria, ternaria, o cuaternaria. Los fluidos inorgánicos tienen límites de temperatura superior en el intervalo de 465 ° C a 600 ° C, lo que permite una mejora en la eficiencia

<sup>115</sup> Cable, R., Blake, K. O. C. D., NREL, H. P., & Potrovitza, N. (2003) *Overview on use of a Molten Salt HTF in a Trough Solar Field*. NREL.

del ciclo de Rankine hasta valores del 0,40 - 0,43 <sup>116</sup>, y un sistema de almacenamiento térmico directo, lo que evita la necesidad de intercambiadores de calor intermedios.

En la Tabla 5 se muestran algunas propiedades de las sales fundidas y sus costes comparándolos con los del aceite Therminol.

Fundir las sales requiere de temperaturas adecuadas a sus puntos de fusión, así pues para ello, las instalaciones que hacen uso de ellas precisan de una calefacción eléctrica de seguimiento en todos los equipos de la sal, lo que supone un coste más a considerar.

La sal solar es relativamente barata y tiene la temperatura de funcionamiento máxima más alta que el aceite térmico, sin embargo se funde a 220 ° C, lo que requiere sistemas bastante caros. La Hitec tiene una temperatura de fusión moderada, de 120 a 140 ° C y es capaz de soportar temperaturas de más de 500° C.

Se deberá determinar si la sal fundida funcionando, también, como HTF, ofrece una reducción suficiente de los costes energéticos y, por tanto, se deberán desarrollar los componentes necesarios y específicos para el uso de sales con esta aplicación; es decir, válvulas, colectores, interconexiones, etc, que por las propiedades de cada fluido serán diferentes.

Abengoa Solar <sup>117</sup> analizó la viabilidad, el costo y el rendimiento de una planta de colectores cilindro-parabólicos con almacenamiento de 6h. Los resultados muestran que la planta con sal fundida como HTF puede reducir el coste de almacenamiento hasta en un 43,2%, el coste del campo solar hasta en un 14,8% y los costes normalizados de energía (LCOE, Levelized Cost of Energy, por sus siglas en inglés) de un 9,8 a un 14,5%. Todo ello en relación con una planta indirecta de aceite con Therminol. Ya que, como se viene desarrollando, al reemplazar el aceite térmico por la sal fundida como fluido de trabajo en el sistema de colectores, esto permite una temperatura de salida del campo solar más elevada, lo que supone una mayor eficiencia bloque de potencia por mejora del ciclo Rankine y un sistema de almacenamiento de energía a menor coste.

---

<sup>116</sup> Maccari, A. (2006). *Innovative Heat Transfer Concepts in Concentrating Solar Fields*. ENEA Solar Thermodynamic Energy, Brussels.

<sup>117</sup> Grogan, D. C. (2013). *Development of Molten-Salt Heat Transfer Fluid Technology for Parabolic Trough Solar Power Plants-Public Final Technical Report (No. DOE/08GO18038)*. Abengoa Solar, LLC.

El almacenamiento térmico con calor sensible en dos tanques de sales fundidas es la técnica de almacenamiento comúnmente utilizada. En los sistemas directos (Figura 29 a), el mismo fluido funciona como HTF y como medio de almacenamiento. En el sistema de almacenamiento indirecto (Figura 29 b), el HTF que opera en el campo solar está transfiere su energía por medio de un intercambiador de calor al medio de almacenamiento, las sales fundidas.

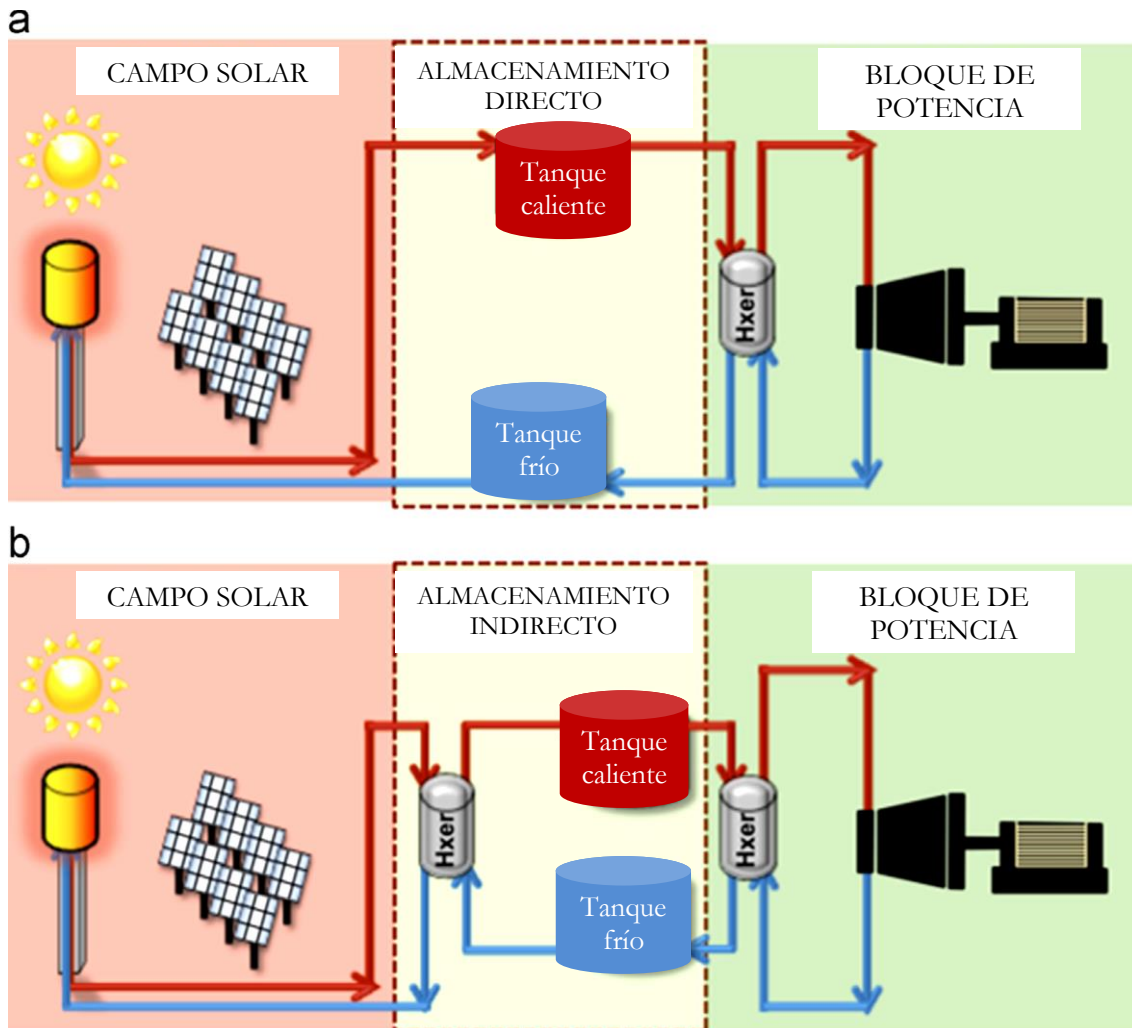


Figura 29. Sistemas de almacenamiento térmico en las plantas termosolares integrados con el campo solar y el bloque de potencia: (a) almacenamiento de calor directo y (b) almacenamiento de calor indirecto.

Fuente: Stekli, J. (2013)<sup>118</sup>

En general, las plantas cilindro-parabólicos utilizan el enfoque de almacenamiento indirecta (Figura 29 b), donde la sal fundida fría se calienta en el intercambiador de

<sup>118</sup> Stekli, J., Irwin, L., & Pitchumani, R. (2013). *Technical challenges and opportunities for concentrating solar power with thermal energy storage*. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 5(2), 021011.

calor por el cual circula aceite suministrado desde el campo solar. Cuando el campo solar no puede proporcionar calor, la sal caliente se puede utilizar para calentar el aceite. Esta técnica se ha demostrado en las plantas Andasol 1 en España y ha sido ampliamente aplicada<sup>119</sup>.

La viabilidad del enfoque directo se ha demostrado en el proyecto Archimede, planta cilindro parabólica de 5 MW en Italia<sup>120</sup> y la planta de torre Solar Two en California<sup>121</sup>.

*Almacenamiento térmico tipo termoclina.*

Un almacenamiento tipo termoclina es un almacenamiento de calor sensible y en un solo tanque. Esto permite una potencial reducción de costes del 35% en comparación con el almacenamiento en dos tanques<sup>122</sup>.

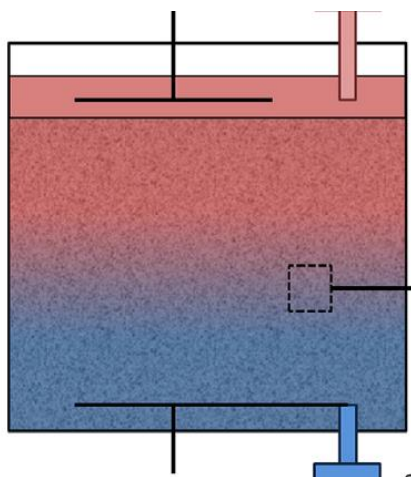


Figura 30. Representación esquemática de un tanque termoclino de sales fundidas, incluyendo el lecho de roca cuarzita intermedio y la columna de líquido fundido. Fuente: Flueckiger, S. M. (2014)<sup>123</sup>

<sup>119</sup> Medrano, M., Gil, A., Martorell, I., Potau, X., & Cabeza, L. F. (2010). *State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 56-72.

<sup>120</sup> Liu, M., Saman, W., & Bruno, F. (2012). *Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(4), 2118-2132.

<sup>121</sup> Medrano, M., Gil, A., Martorell, I., Potau, X., & Cabeza, L. F. (2010). *State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 56-72.

<sup>122</sup> Brosseau, D., Kelton, J. W., Ray, D., Edgar, M., Chisman, K., & Emms, B. (2005). *Testing of thermocline filler materials and molten-salt heat transfer fluids for thermal energy storage systems in parabolic trough power plants*. Journal of Solar Energy Engineering, 127(1), 109-116.

<sup>123</sup> Flueckiger, S. M., Iverson, B. D., & Garimella, S. V. (2014). *Economic optimization of a concentrating solar power plant with molten-salt thermocline storage*. Journal of Solar Energy Engineering, 136(1), 011015.

En los sistemas de termoclina, los fluidos caliente y frío se almacenan en el mismo tanque y se separan debido a la estratificación térmica<sup>124</sup>. Se puede utilizar un deflector de aislamiento para mantener el fluido caliente y el fluido frío aislados uno de otro, así, el deflector se moverá horizontalmente en el interior del tanque, sosteniendo el fluido caliente por encima de él y el fluido frío a continuación. Este concepto ha sido patentado y el empleado por primera vez será en una planta en España<sup>125</sup>.

### 3.5.1.2. Almacenamiento de calor latente.

En este tipo de almacenamiento, el calor almacenado y cedido está involucrado en un cambio de fase, así pues proceso se produce a una temperatura constante.

El cambio de líquido-gas conlleva un aumento del volumen, por ello se ha investigado sistemas con cambios sólido-líquido, sin olvidar que el mecanismo de transferencia de calor cambia entre conducción y convección lo que afecta al diseño de los equipos de intercambio<sup>126</sup>.

La cantidad de la energía almacenada se rige tanto por el calor específico como por la entalpía de cambio de fase y se puede calcular por la Ecuación 5.

$$Q = m [C_{p,s}(T_m - T_s) + h + C_{p,l}(T_l - T_m)]$$

Ecuación 5

Donde, Cps y Cpl son corresponden a los calores específicos del material de cambio de fase, en sus fases sólida y líquida, respectivamente. Tm es la temperatura de fusión, h la entalpía de cambio de fase y Ts y Tl las temperaturas de la fase sólida y líquida respectivamente.

La energía implicada en el cambio de fase ofrece al proceso la liberación de un de calor anisotérmico. Esto, teóricamente, permite un almacenamiento de menor tamaño y

---

<sup>124</sup> Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lazaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 31-55.

<sup>125</sup> European Academies Science Advisory Council (2011). *Concentrating solar power: its potential contribution to a sustainable energy future*. EASAC policy report.

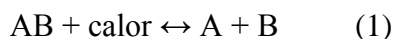
<sup>126</sup> Liu, M., Belusko, M., & Bruno, F. (2016). *High temperature phase change thermal energy storage for concentrating solar power plants*. Energy News, 34(1), 4.

menor costo en comparación con un sistema de almacenamiento sensible con el mismo cambio de temperatura. Pero actualmente, no existen aplicaciones CSP a escala comercial<sup>127</sup>.

Las sales han sido los materiales más estudiados para este tipo de aplicaciones. Existe un desarrollo basado en la utilización de tres mezclas de sales que se encapsulan y es en el interior de estas cápsulas donde se produce el cambio de fase. En la parte inferior de un tanque, se colocan las cápsulas y el HTF se hace pasar a través de todo el tanque. Como las sales tienen un punto de fusión inferior, al paso del HTF, se va produciendo en cascada<sup>128</sup>.

### 3.5.1.3. Almacenamiento termoquímico.

En el almacenamiento termoquímico, la energía se almacena por medio de la siguiente reacción química reversible.



El reactivo químico AB absorbe el calor suministrado desde el campo solar y se disocia en dos, los productos A y B que se puede almacenar por separado. En el proceso reversible (reacción exotérmica), los productos químicos A y B se ponen en contacto y forman el reactivo inicial AB con una liberación de calor. La cantidad de calor almacenado en un proceso termoquímico está determinada por la ecuación.

$$Q = a_r m \Delta H$$

Ecuación 6

Donde  $a_r$  es la fracción que reacciona;  $m$ , la masa de reactante AB y  $\Delta H$ , el calor de reacción por unidad de masa.

El almacenamiento termoquímico posee una alta densidad de energía y la pérdida de calor insignificante, lo que potencialmente ofrece un almacenamiento a largo plazo, siendo una opción muy acertada para volúmenes de almacenamiento relativamente pequeños. Este proceso suele ser capaz de almacenar el calor a una temperatura de

---

<sup>127</sup> Liu, M., Tay, N. S., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., & Bruno, F. (2016). *Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 1411-1432.

<sup>128</sup> Kraemer, S. (2014). *Two innovative technologies to cut the cost of energy storage*. CSP Today.

menos de 400 ° C y el calor de reacción es típicamente entre 20 y 70 kJ / mol. Los procesos investigados incluyen sales metálicas con agua, amoníaco, metanolmetilamoníaco y aleaciones de metal con hidrógeno<sup>129</sup>.

En comparación con el almacenamiento de calor sensible y latente, el almacenamiento termoquímico es todavía una etapa temprana de desarrollo y hasta ahora la mayoría de los sistemas sólo se han puesto a prueba a escala de laboratorio<sup>130</sup>. El avance de esta aplicación es un desafío que debe ser abordado en busca de un futuro con almacenamiento termoquímico.

#### **3.5.1.4. Apoyo auxiliar.**

La idea es tender a un sistema 100% renovable y actualmente las centrales termoeléctricas tienen capacidades técnicas suficientes para no tener que disponer del uso de sistemas de generación auxiliar basados en calderas convencionales de gas, si bien es cierto que existen centrales termosolares con ellos ya sea por falta de almacenamiento o bien por seguridad de suministro

Con un sistema de apoyo, la planta puede funcionar 24 horas al día, manteniendo su potencia prácticamente constante. Durante la noche, es la caldera de apoyo la que mantiene el grueso de la producción energética. En las horas centrales del día, si hay sol, es el campo de captación el que proporciona el aporte y, si es posible, alimenta el sistema de almacenamiento. La energía contenida en éste es utilizada a continuación, hasta que entra en acción la caldera de gas. Por supuesto, en general, el funcionamiento de la planta podrá tener diferentes aportes de cada sistema en cada momento, regidos por la aleatoriedad del recurso solar y por las variaciones en la demanda eléctrica a lo largo del día o del año.

---

<sup>129</sup> Cot-Gores, J., Castell, A., & Cabeza, L. F. (2012). *Thermochemical energy storage and conversion: A state-of-the-art review of the experimental research under practical conditions*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(7), 5207-5224.

<sup>130</sup> Aydin, D., Casey, S. P., & Riffat, S. (2015). *The latest advancements on thermochemical heat storage systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 356-367.

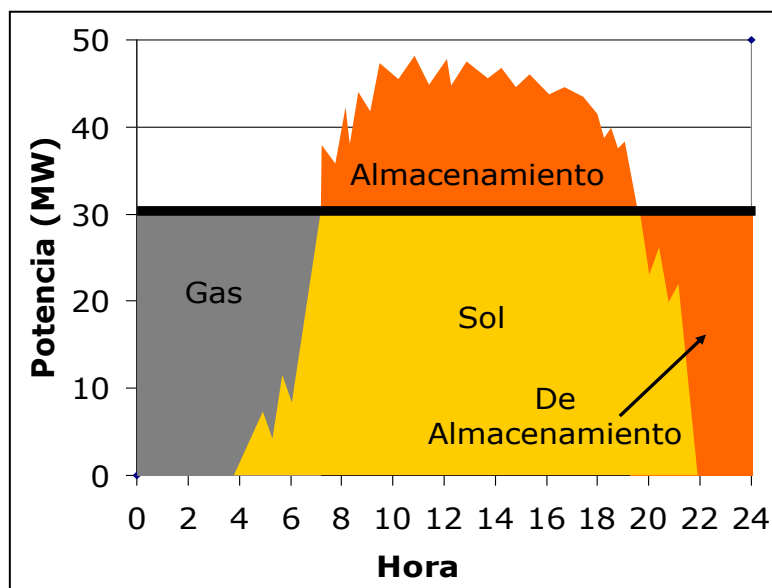


Figura 31. Esquema de funcionamiento de un sistema termoelectrico con almacenamiento térmico y sistema de apoyo mediante una caldera de gas

La figura muestra este esquema de funcionamiento para el caso de una planta de 30 MW de potencia nominal, con apoyo mediante caldera de gas. Se han señalado, para cada hora, los aportes de los diferentes subsistemas.

### 3.6. Situación actual de la energía solar termoelectrica.

Las primeras experiencias prácticas que se llevaron a cabo con CCP tuvieron lugar a caballo en los siglos XIX y XX, siendo realizadas por los americanos J. Ericsson en 1870 y F. Schumann en 1912<sup>131</sup>. Desde aquellas primeras experiencias hasta los años setenta del siglo XX no se llevaron a cabo actividades dignas de mención en relación con los CCP. Pero a mediados de los años ochenta de ese mismo siglo comenzó la instalación de las plantas SEGS (Solar Electricity Generating Systems) en el desierto de Mohave (California, USA) a cargo de la empresa *LUZ Industries*<sup>132</sup>. Las plantas SEGS son centrales termosolares (centrales que generan electricidad a partir de la radiación solar concentrada, convirtiéndola primero en energía térmica) que producían, y siguen produciendo, electricidad a partir de campos solares con CCP. Los más de 2,5 millones de metros cuadrados de este tipo de captadores instalados en las plantas SEGS fueron durante muchos años el mejor exponente comercial de este tipo de captadores solares.

<sup>131</sup> Delyannis, E. (2003). *Historic background of desalination and renewable energies*. Solar Energy, 75(5), 357-366.

<sup>132</sup> Johansson, T. B. (1993). *Renewable energy: sources for fuels and electricity*. Island press.



En marzo de 2015, el mercado de la energía solar termoeléctrica tenía una capacidad total de 5840 MWe en todo el mundo, entre los que 4800 MWe está en funcionamiento y 1040 MWe están en construcción. España tenía una capacidad operativa total de 2405 MW y 100 MW en construcción, por lo que es el país más importante del mundo en este ámbito. EE.UU. seguía a España, con una capacidad total de 1795 MW. El interés ha crecido en la India, Chile, Sudáfrica, Australia, China y algunos países de Oriente Medio. Los sistemas de colectores cilindro-parabólicos son actualmente la tecnología CSP más probada y dominan el mercado mundial, siendo instalado en más del 80% de las plantas de CSP en funcionamiento y en construcción. Los sistemas de torre acaban de comenzar a ser introducidos en aplicaciones comerciales y las plantas de Fresnel lineales están haciendo actualmente la transición a aplicaciones comerciales. Los discos parabólicos Stirling están en fase de demostración temprana<sup>133</sup>.

El avance de la técnica debe estar acorde con un marco legal que permita su desarrollo. En España, la producción de electricidad mediante energía termosolar fue, de entre todas las tecnologías de Régimen Especial, la última en recibir apoyos.

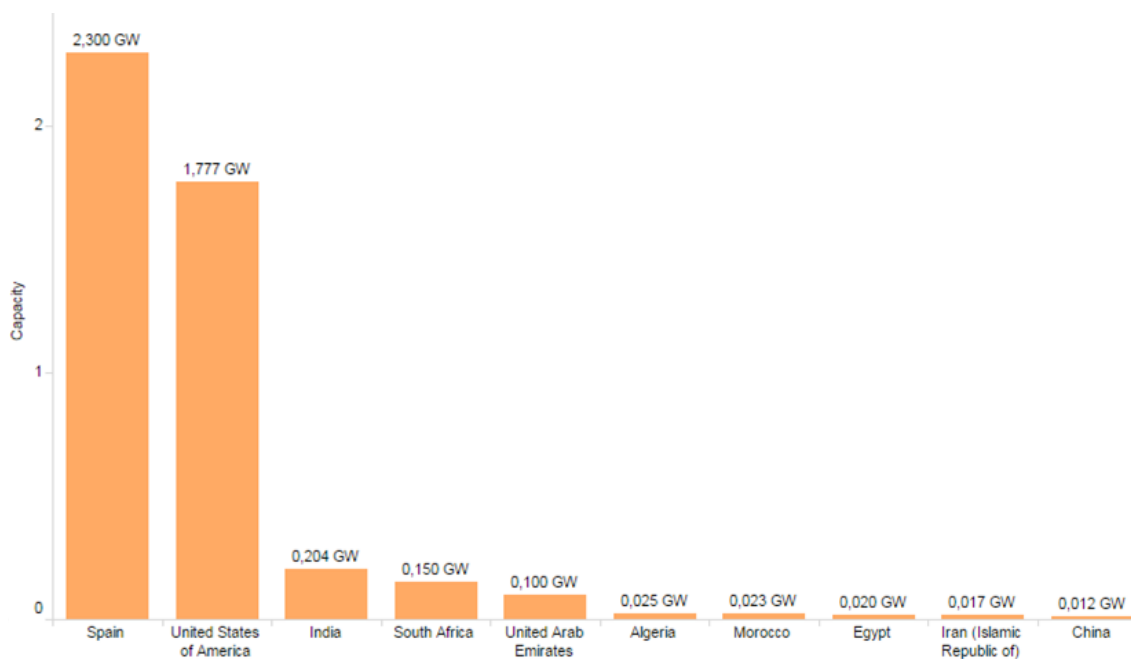
La Ley 54/1997<sup>134</sup>, que es la ley de liberalización del mercado eléctrico español, estableció la posibilidad de primar a las tecnologías renovables de generación eléctrica. Sin embargo en la Ley de Acompañamiento de los Presupuestos generales del Estado de dicho año, por error o por intención, en lugar de dejar abierta la puerta a los apoyos en futuros Reales Decretos a las diferentes formas de generación solar se limitó exclusivamente a la fotovoltaica. Fueron necesarios más de tres años hasta que pudo aprobarse una enmienda que permitiese también los apoyos a la termosolar. Se perdió, por tanto, la posibilidad del R.D. 2818/1998 y en el posterior R.D. 1432/2002, aunque ya se incluyó una prima para esta tecnología, fue claramente insuficiente para animar a las empresas a presentar proyectos.

---

<sup>133</sup> Liu, M., Tay, N. S., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., & Bruno, F. (2016). *Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 1411-1432.

<sup>134</sup> Gobierno de España. (1997). *Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico Español*. Boletín Oficial del Estado, (285)

No fue entonces hasta el R.D 436/2004<sup>135</sup> cuando se estableció un nivel de apoyos que permitió un tímido despegue de la actividad termosolar en España. Tres años después se publicó el R.D. 661/2007<sup>136</sup> en el que se modificaron algunos aspectos operativos y se definió unos niveles de primas ligeramente superiores, lo que motivó un mayor interés por parte de las empresas para promover proyectos termosolares. El límite de potencia que contemplaba este R.D. para poderse acoger a él era con instalaciones no superiores a 50 MW.



IRENA

Figura 32. Capacidad termosolar instalada, por países, a finales de 2015. Fuente: IRENA.

Ante el temor de que se produjera un boom termosolar parecido al de la fotovoltaica, el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo publicó el 7 de mayo de 2009 el Real Decreto Ley 6/2009<sup>137</sup>, creando el llamado Registro de Pre-asignación de Retribución, que limitaría la posibilidad de acogerse a este régimen económico exclusivamente a los proyectos que a dicha fecha cumpliesen los requisitos de disponer de todos los permisos (Autorización Administrativa, Licencia de Obras, Conexión a Red, Derecho de Uso de

<sup>135</sup> Gobierno de España. (2004). *Real Decreto 436/2004, de 12 de marzo, por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial*. Boletín Oficial del Estado, (75)

<sup>136</sup> Gobierno de España. (2007). *Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial*. Boletín Oficial del Estado, (126).

<sup>137</sup> Gobierno de España. (2009) *Real Decreto-ley 6/2009, de 30 de abril, por el que se adoptan determinadas medidas en el sector energético y se aprueba el bono social*. Boletín Oficial del Estado, (111).

Agua), pudiesen demostrar que habían comprometido la compra del 50% de los equipos, y que disponían al menos del 50% de la financiación necesaria, además de aportar un aval que perderían si no se llegaba a construir el proyecto una vez registrado. Aún tras dicho R.D., las tarifas vigentes seguían siendo las establecidas en 2007. En la actualidad, el R.D. 661/2007 no está vigente.

El marco tarifario definido en España por el R.D. 661/2007<sup>138</sup> para la electricidad producida con centrales termosolares reavivó el interés por los CCPs y se propusieron en menos de dos años más de 200 proyectos de plantas solares de este tipo, con una potencia total superior a los 10 GWe, de los cuales fueron aprobados solo 2,4 GWe para estar operativos a finales del 2013. A principios del año 2013 ya había 2 GWe en operación. En los años 2012 y 2013 se redujeron sustancialmente las ayudas públicas a las centrales termosolares<sup>139</sup> y se suprimió la prima aprobada en el año 2007, lo cual hizo que España dejara de ser un mercado atractivo para las centrales termosolares, aun siendo uno de los países de Europa con mayor número de horas de sol anuales. Pero, afortunadamente, sigue existiendo un gran interés comercial por los CCP en otros países donde se están construyendo varias centrales termosolares con CCP (Sudáfrica, India y EEUU principalmente).

---

<sup>138</sup> Gobierno de España. (2007). *Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial*. Boletín Oficial del Estado, (126).

<sup>139</sup> Gobierno de España. (2012). *Real Decreto-ley 1/2012 por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución en las nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial*. Boletín Oficial del Estado, (24)

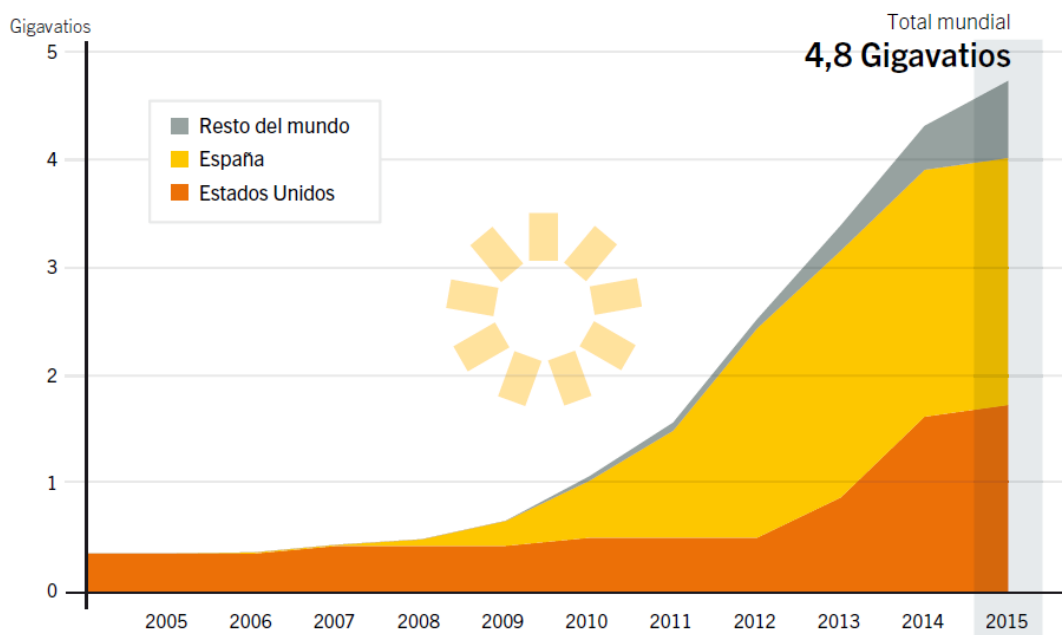


Figura 33. Capacidad mundial de energía solar térmica de concentración, por país o región, 2005-2015.  
Fuente: REN21 (2016).

En 2015, Marruecos (160 MW), Sudáfrica (150 MW) y Estados Unidos (110 MW) construyeron nuevas instalaciones de energía solar térmica de concentración en línea, elevando la capacidad total mundial alrededor de un 10%, cerca de 4,8 GW. Las nuevas instalaciones representan una combinación de tecnologías parabólicas y de torre, y se confirma la tendencia de incorporar almacenamiento de energía térmica, todas ellas lo incorporan. Al final del año, la capacidad de energía solar de concentración (CSP por sus siglas en inglés) estaba bajo construcción en Marruecos (350 MW), Sudáfrica (200 MW), Israel (121 MW), Chile (110 MW), Arabia Saudita (100 MW), China (50 MW) e India (25 MW), lo que refleja un cambio desde los mercados tradicionales (España y Estados Unidos) hacia regiones con altos niveles de radiación directa normal<sup>140</sup>

<sup>140</sup> Ren21, R. (2016). *Global status report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, France.

# CAPÍTULO IV

# **4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS.**

## 4.1. Introducción.

La concienciación sobre la protección ambiental se encuentra en continuo crecimiento. Así pues el interés por el desarrollo de métodos capaces de determinar los impactos que provocan los productos y servicios en el medio ambiente hace que surjan herramientas y metodologías para cuantificarlos. El rendimiento medioambiental de los productos y procesos se ha convertido en una cuestión clave, por lo que se están investigando maneras de minimizar sus efectos sobre el medio ambiente. Muchas empresas han visto la conveniencia de explorar formas de moverse más allá del cumplimiento mediante estrategias de prevención de la contaminación y sistemas de gestión ambiental para mejorar su desempeño ambiental. Una de estas herramientas es ACV. Este concepto considera todo el ciclo de vida de un producto<sup>141</sup> siendo la técnica más completa desarrollada en este sentido y ampliamente reconocida por la comunidad científica.

A medida que aumenta la conciencia ambiental, industrias y empresas están evaluando cómo sus actividades afectan al medio ambiente. La sociedad se ha convertido en preocupación por los problemas de agotamiento de los recursos naturales y la degradación del medio ambiente. Muchas empresas han respondido a esta toma de conciencia, proporcionando productos "verdes" y el uso de procesos "verdes".

El ACV trata los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto (expresión relativa, ya que está relacionada con la unidad funcional del sistema, tal y como se desarrollará a continuación), desde la adquisición de materia prima, producción, uso, hasta su disposición final<sup>142</sup>.

Existen cuatro fases de estudio, todas ellas interrelacionadas, tal y como representa la Figura 34.

- Definición de objetivo y el alcance.
- Análisis del inventario.
- Evaluación del impacto.
- Interpretación.

---

<sup>141</sup> Curran, M. A. (1996). *Environmental life-cycle assessment*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1(3), 179-179.

<sup>142</sup> ISO, E. 14040 (2006): *Análisis del ciclo de vida del producto*.

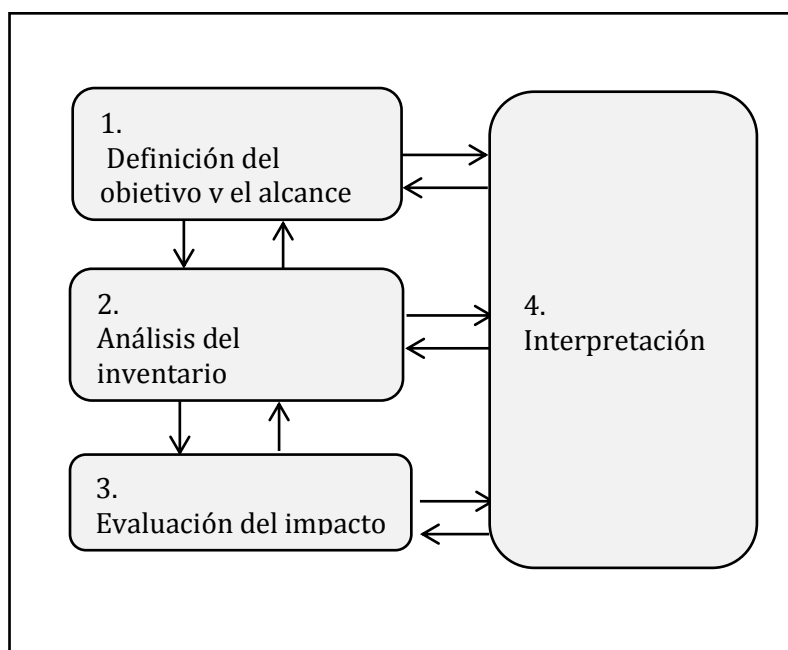


Figura 34. Fases de un ACV según norma ISO 14040:2006.

Mediante el ACV, la suma de todas las entradas de materia y energía (inputs) y salidas de residuos y emisiones (outputs) puede valorarse como el impacto ambiental del producto, agrupando los resultados en una serie de categorías medioambientales predefinidas.

En 1993, la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) definió el ACV como un procedimiento objetivo de evaluación de cargas energéticas y ambientales correspondientes a un proceso o a una actividad, que se efectúa identificando los materiales y la energía utilizada y los vertidos al entorno. La evaluación se realiza en el ciclo de vida completo del proceso o actividad, incluyendo la extracción y tratamiento de la materia prima, la fabricación, el transporte, la distribución, el uso, el reciclado, la reutilización y la disposición final<sup>143</sup>.

La primera versión de una norma ISO sobre ACV, la ISO 14040:1997, lo definió como una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y

<sup>143</sup> SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), (1993). *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice*. Brussels, Belgium.



salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio<sup>144</sup>.

El ACV tiene como objetivos:

- Suministrar información, lo más completa, objetiva y transparente como sea posible de las interacciones del producto, el proceso o la actividad con el medio ambiente.
- Contribuir a entender todas las consecuencias interdependientes ambientales de las actividades humanas.
- Prever consecuencias negativas de la toma de decisiones e identificar oportunidades para mejoras ambientales.
- Facilitar el diálogo constructivo entre diferentes sectores de la sociedad preocupados por la calidad ambiental.

La sola realización de un ACV ya resulta útil como herramienta para la gestión medioambiental, ya que posibilita la identificación del problema para optimizar el uso de recursos<sup>145</sup>.

El ACV tiene aplicaciones directas tales como desarrollo y mejora del producto, ecodiseño, planificación estratégica, desarrollo de políticas públicas o sencillamente marketing<sup>146</sup>.

Cabe destacar que actualmente existen diversos métodos para el cálculo de un ACV los cuales están en continuo proceso de mejora. La metodología debe contemplar la inclusión de nuevos avances científicos y mejoras en el estado de la técnica.

Así pues, el grado de detalle de un ACV y su marco temporal estarán de acuerdo con el objetivo y alcance definidos. El alcance, las hipótesis, la descripción de la calidad de los datos, las metodologías y los resultados deberán ser transparentes. Sin olvidar que la vida útil y la asignación de cargas son aspectos fundamentales ya pueden cambiar enormemente los resultados obtenidos.

---

<sup>144</sup> ISO, E. 14040 (2006): *Análisis del ciclo de vida del producto*.

<sup>145</sup> Wrisberg, N., Haes, H. A. U. D., Clift, R., Frischknecht, R., Grisel, L., Hofstetter, P., & Stiller, H. (1997). *A strategic research programme for life cycle assessment*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2(2), 71-72.

<sup>146</sup> ISO, E. 14040 (2006): *Análisis del ciclo de vida del producto*.

## 4.2. Marco de referencia.

La normalización internacional ISO (International Organization for Standardization) es un organismo no gubernamental creado en 1946 encargado de promover el desarrollo de normas internacionales de fabricación, comercio y comunicación. Conforman una red de los institutos de normas nacionales de 157 países

Las normas que promueve son normas voluntarias y es esta organizada en: TC (Technical Committee), SC (Sub-Committee) y WG (Working Groups)

El TC 207 Es el responsable de normalizar la gestión ambiental (serie ISO140XX) El SC 5 (del TC207) se ocupa de la normalización del ACV, con 5 grupos de trabajo.

Actualmente, dos de estas normas marcan la manera de proceder en cuanto a la realización de un ACV. La UNE –EN ISO 14040:2006 Gestión Medioambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Y la UNE –EN ISO 14044:2006 Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices, la cual refunde las antiguas ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043.

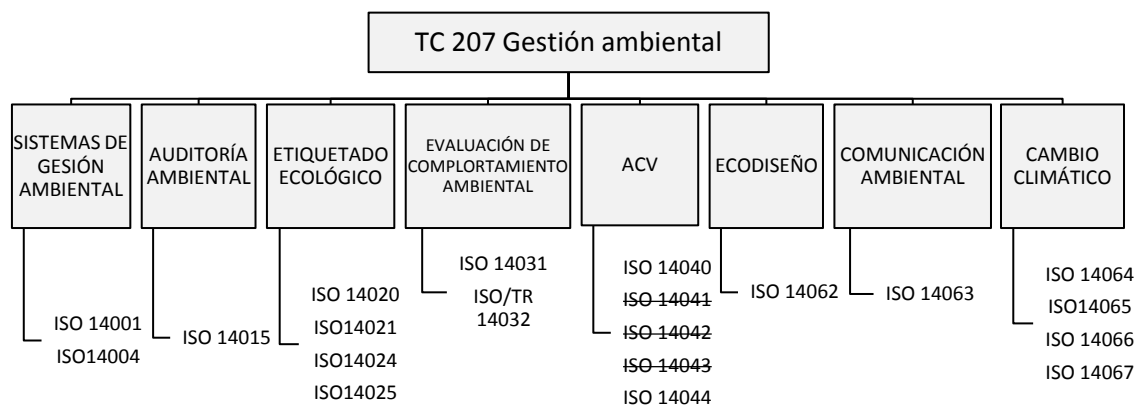


Figura 35. Organigrama del TC 207. Elaboración propia con datos de [www.iso.org](http://www.iso.org)

### **4.3. Definición y exposición de las distintas fases de un ACV según la norma ISO 14040:2006.**

#### **4.3.1. Definición del objetivo y el alcance.**

Es en esta primera fase donde se definen con exactitud tanto el objetivo del estudio como el propósito con el que se realiza así como a quién van dirigidos los resultados del mismo.

Esta fase condiciona el resto de elementos del ACV, desde el tiempo de trabajo, los recursos necesarios para su elaboración y hasta los resultados finales<sup>147</sup>. Por ello es preciso, también, determinar cuál será los límites del sistema, la unidad funcional y definir las posibles reglas de asignación de cargas.

##### **4.3.1.1. Límites del sistema**

La norma aporta libertad a la hora de elegir qué procesos forman parte del análisis y cuáles no. Tan solo será analizado todo aquello que quede dentro de los límites del sistema, por ello será importante documentar los criterios utilizados para tomar la decisión sobre cuáles son los límites adecuados para el estudio en cuestión, en relación siempre con el objetivo marcado<sup>148</sup>. Así será entonces la unidad funcional a analizar.

Existen numerosos límites conocidos como:

- De la puerta a la puerta (gate to gate), cuando el ACV solo tiene en cuenta la etapa de producción.
- De la cuna a la puerta (cradle to gate), referido a los ACV que consideran los procesos desde la extracción de materias primas hasta la producción de los productos.
- De la cuna a la tumba (cradle to grave), son los ACV con límites comprendidos entre la extracción de materias primas y la disposición final del producto.

---

<sup>147</sup> Curran, M., (2006) *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*, National Risk Management Research laboratory. Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency.

<sup>148</sup> Guinée, J. B. (2002). *Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards*. The international journal of life cycle assessment, 7(5), 311-313

- De la cuna a la cuna (cradle to cradle), ACV de productos con procesos circulares, en los que se tiene en cuenta cómo el producto es reincorporado a la cadena de suministro en alguno de sus puntos.

La Figura 36, muestra estos límites. No son los únicos posibles pero sí los más conocidos y usados.

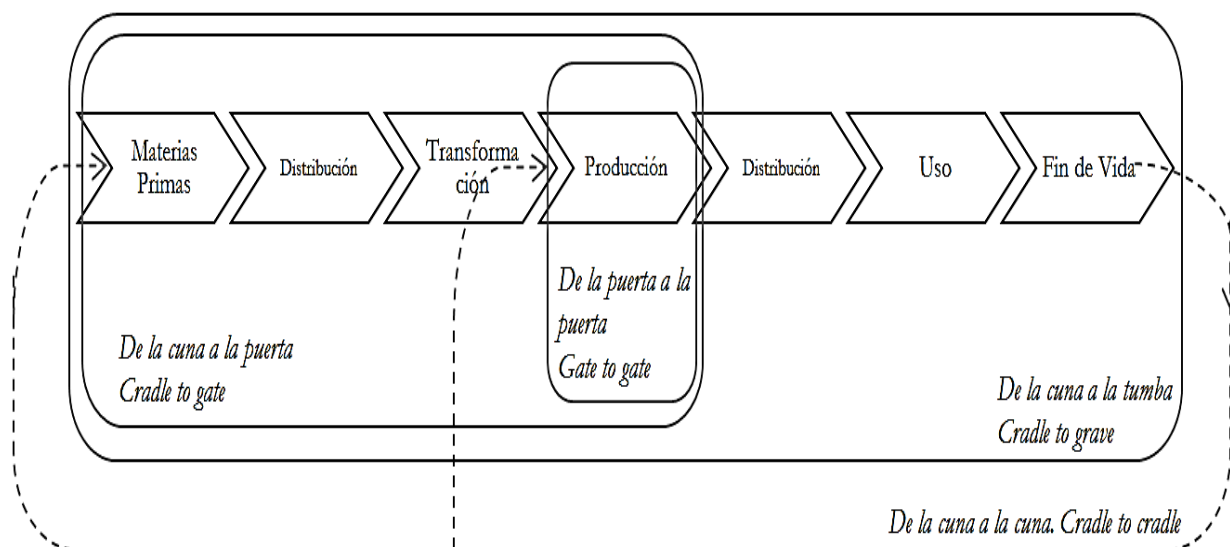


Figura 36. Límites de un ACV. Elaboración propia.

La unidad funcional se puede definir como la cuantificación de la función identificada y cuyo objetivo es proporcionar una referencia para todas las entradas y salidas del sistema en estudio (nos permitirá valorar y comparar de forma objetiva, todos los impactos generados). Será la unidad a la cual irán referidas las entradas y salidas<sup>149</sup>.

O bien como, el desempeño cuantificado de un sistema del producto para su uso como unidad de referencia<sup>150</sup>.

#### 4.3.1.2. Asignación

Pocos procesos industriales producen una salida única o están basados en una relación lineal entre las entradas y salidas de materias primas. Así pues la norma ISO 14040:2006, marca la necesidad de considerar procedimientos de asignación.

<sup>149</sup> Lechón, Y., H. Cabal, C. Lago, C. de la Rúa, R. M. Sáez, and M. Fernández, (2005). *Análisis del ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte. Fase I. Análisis del Ciclo de Vida Comparativo del Etanol de Cereales y de la Gasolina. Energía y Cambio Climático*, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente. Ministerio de Educación y Ciencia. CIEMAT.

<sup>150</sup> ISO, E. (2006). 14040: 2006. *Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*.

En este punto, deben estipularse claramente los principios aplicados a la asignación de los flujos de materiales, energía y emisiones asociadas a los diferentes productos. Se podría aplicar el principio de causalidad, es decir, asignar las cargas al producto que las causa, o bien al producto a causa del cual existe dicha actividad. Cuando este principio no es aplicable o no es adecuado, se pueden pensar otros métodos como cantidad, volumen, etc. Uno muy destacado es el que consiste en que la suma de las entradas y salidas de los sistemas asignados deben ser igual a la suma de las entradas y salidas antes de la asignación (la llamada regla de 100 %)<sup>151</sup>.

#### **4.3.1.3. Perspectiva atribucional o consecuencial**

Durante un seminario celebrado en 2003, en particular en el relativo a inventarios del ciclo de vida para la generación de electricidad, los participantes reconocieron la necesidad de elegir un método de asignación dependiendo si la evaluación del ciclo de vida se realiza a partir de una atribución o de un punto de vista consecuencial.

El término análisis de ciclo de vida atribucional se definió como para responder a la cuestión de cómo fluyen los contaminantes, los recursos y el intercambio entre procesos dentro de la ventana temporal elegida para el análisis, mientras que la perspectiva consecuencial intenta dar respuesta a qué sucede más allá del sistema de cambio inmediato en respuesta a las decisiones tomadas<sup>152</sup>. Por ejemplo, un ACV atribucional examinaría el uso de la energía renovable en comparación con las fuentes convencionales. Un ACV consecuencial tendría que considerar las consecuencias de que sólo una cierta cantidad de energía renovable esté disponible provocando que algunos usuarios, a causa de esto, tengan que comprar energía convencional, por no haber suministro suficiente para abastecer a todo el mundo aún.

La elección entre la realización de una perspectiva atribucional o consecuencial depende del objetivo del estudio.

En la presente tesis doctoral se ha aplicado el enfoque atribucional por la delimitación del sistema, es decir, el sistema de inventario refleja los procesos realmente afectados

---

<sup>151</sup> Vrijders, J., & Delem, L. (2010). *Economical and environmental impact of low energy housing renovation*. BBRI, LEHR Res, 1.

<sup>152</sup> Curran, M. A., Mann, M., & Norris, G. (2005). *The international workshop on electricity data for life cycle inventories*. Journal of Cleaner Production, 13(8), 853-862.

tal y como recomienda B. Weidema<sup>153</sup>. Las diferencias fundamentales entre los ACV consecuenciales y atribucionales se resumen en la Tabla 6.

	Consecuencial	Atribucional
Naturaleza	Intenta predecir la respuesta a un cambio en la demanda.	Describe la forma de producción tal y como se lleva a cabo.
Procesos incluidos	Marginal	Media
Asignación	Las asignaciones de cargas a los coproductos son evitadas por el sistema.	Las asignaciones de cargas a los coproductos se tratan usando reglas de asignación.

Tabla 6. Principales diferencias entre la perspectiva atribucional y consecuencial. Fuente: Weidema, B. P. (2003). *Market information in life cycle assessment* (Vol. 863, p. 365). Miljøstyrelsen.

#### 4.3.2. Análisis de inventario.

El Inventario de Ciclo de Vida (ICV) conlleva la recogida de los datos necesarios para cumplir con el objetivo y alcance del estudio. En esencia, se trata de un inventario de los datos de entrada y de salida relacionados con el sistema en estudio. Se tiene que anotar el conjunto de flujos de materiales, de energía y emisiones que atraviesan los límites del sistema en estudio<sup>154</sup>.

Un inventario del ciclo de vida es un proceso de cuantificación de las necesidades de energía y materias primas, así como de las emisiones atmosféricas, los vertidos al agua, los residuos sólidos y otros, comunicados para todo el ciclo de vida de un producto, proceso o actividad.

El resultado adopta la forma de tabla de inventario. Al fin y al cabo un análisis de inventario supone generar una lista que contiene las cantidades de sustancias liberadas al medio ambiente y la cantidad de energía y material consumido.

<sup>153</sup> Weidema, B. P. (2003). *Market information in life cycle assessment* (Vol. 863, p. 365). Miljøstyrelsen.

<sup>154</sup> Baumann, H., & Tillman, A. M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application*. External organization,

Los resultados pueden ser segregados por etapa del ciclo de vida, por medio (aire, agua y tierra), por otros procesos específicos, o bien por cualquier combinación de los mismos.

En la fase de inventario del ciclo de vida de un ACV, todos los datos relevantes se recogen y organizan. Sin un correcto inventario del ciclo de vida, no existe base para evaluar los impactos ambientales o potenciales mejoras. El nivel de precisión y detalle de los datos recogidos se refleja en todo el resto de la proceso.

La escasez de recursos para la recopilación de datos pueden dañar el contexto en la definición del sistema, aunque, en ningún caso debe poner en peligro la base científica del estudio. El nivel de detalle requerido para realizar una inventario exhaustivo depende del tamaño del sistema y el propósito del estudio.

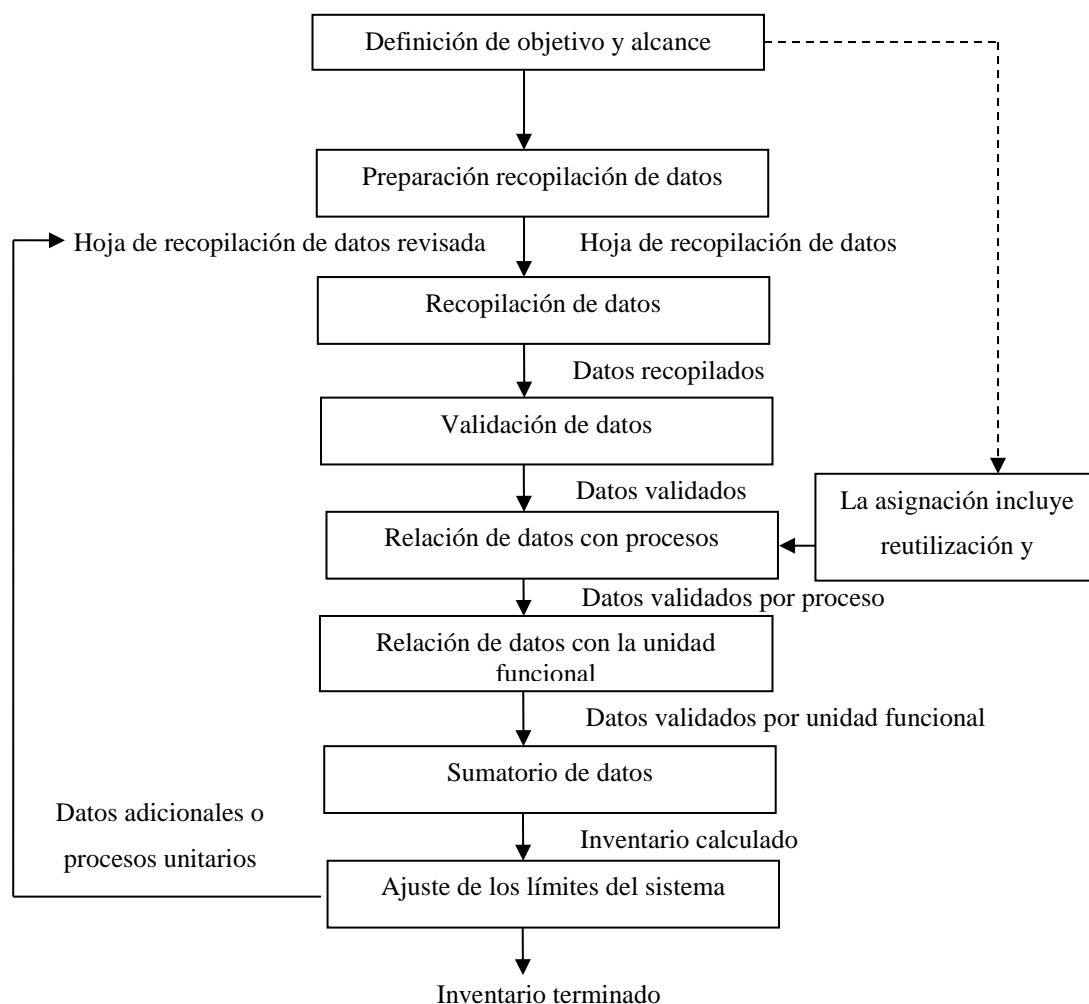


Figura 37. Procedimiento para el análisis de inventario. Fuente: ISO 14040:2006.

A pesar de que se puede obtener mucha información acerca de un proceso considerando los datos de inventario del ciclo de vida, será la evaluación de impacto la que proporcione una contribución más significativa para hacer comparaciones<sup>155</sup>. Por ejemplo, tan solo mirando el inventario se puede conocer que cierto proceso emite unas toneladas de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> a la atmósfera durante su fabricación; ambos son gases de efecto invernadero potencialmente dañinos, pero es una evaluación del impacto del ciclo de vida de ellos la que puede determinar lo que podría tener un mayor impacto y responder a cuestiones como ¿Qué es más dañino para el medio ambiente?, ¿y para los ecosistemas?, ¿cuáles son sus posibles efectos sobre el calentamiento global? ¿Y en la formación de smog?

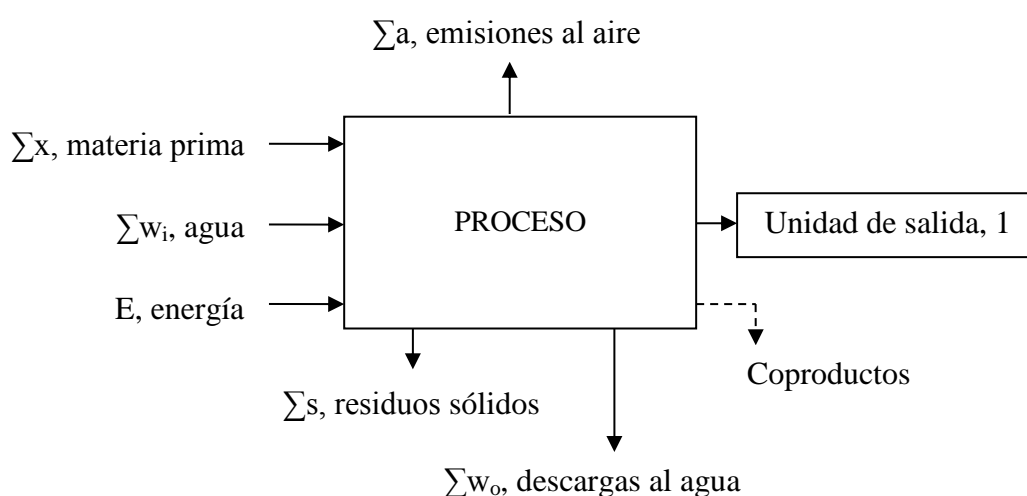


Figura 38. Inventario de Ciclo de vida esquematizado.

$$\text{Donde, } \Sigma x + \Sigma w_i + E = 1 + \Sigma a + \Sigma w_o + \Sigma s$$

Ecuación 7. Balance de entradas y salidas en el inventario de ciclo de vida.

<sup>155</sup> Klöpffer, W. (1997). Life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 4(4), 223-228.



### 4.3.3. Evaluación de Impacto.

La Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV) es el proceso técnico para caracterizar y evaluar los efectos de las cargas ambientales identificadas en el análisis de inventario<sup>156</sup>.

Se compone de varias etapas, que se definen a continuación:

- **Clasificación:** Fase donde se asignan los datos del inventario a cada una de las diferentes categorías de impactos.
- **Caracterización:** Fase donde se cuantifican y se agregan, mediante factores de caracterización los datos del inventario en las diferentes categorías de impactos.

Las sustancias que contribuyen a una categoría de impacto son multiplicadas por un factor de caracterización que expresa la contribución relativa de la sustancia a la categoría de impacto en cuestión<sup>157</sup>. Por ejemplo, el factor de caracterización para el CO<sub>2</sub> en la categoría de impacto cambio climático puede ser 1, mientras que el factor de caracterización del CH<sub>4</sub> es 25. Esto significa que la liberación de 1 kg de metano aporta que la misma contribución a la categoría de cambio climático como 25 kg de CO<sub>2</sub>.

- **Normalización:** Fase donde se valora la contribución relativa de cada uno de los diferentes tipos de impacto. Si se conociera para cada efecto ambiental las emisiones globales, o la emisión media que causa una persona durante un año, y se dividieran los resultados por esos datos globales (o medios), se podría conocer la fracción que representa dicha emisión.
- **Ponderación:** Fase donde los datos de las diferentes categorías de impacto, una vez normalizados, se ponderan de nuevo y se agregan para obtener un resultado único o índice ambiental. La norma ISO 14040:2006 considera la ponderación como un elemento opcional en la EICV.

Los factores de ponderación están basados en valoraciones subjetivas, los pasos de ponderación no tienen una base científica, existen expertos que consideran

---

<sup>156</sup> Duda, M., & Shaw, J. S. (1997). *Life cycle assessment*. Society, 35(1), 38-43.

<sup>157</sup> White, A., & Shapiro, K. (1993). *Life cycle assessment*. Environmental science & technology, 27(6), 1016-1017.

que debido a ello, no debería formar parte de la fase de EICV sino de la parte de interpretación<sup>158</sup>.

Métodos como Ecoindicador o Recipe disponen de diferentes factores de ponderación según se adopten las perspectivas de ponderación<sup>159</sup>.

*Individualista*. La naturaleza es algo robusto que será capaz de resarcirse de los posibles impactos. Se manejaría adaptándose al cambio producido.

*Igualitario*. La naturaleza es frágil, así pues el daño es irreparable. Se manejaría bajo prevención para que no sucediese.

*Jerárquico*. La naturaleza es robusta pero no del todo. Según el daño será reparable o irreparable. Es la visión más aceptada. Se manejaría bajo un entorno de control.

Así pues, la ponderación no es un proceso estrictamente técnico por el propio hecho de anexionar categorías de impacto con diversas unidades en un único índice. Es por ello que en la presente tesis doctoral, no se realizará tal proceso.

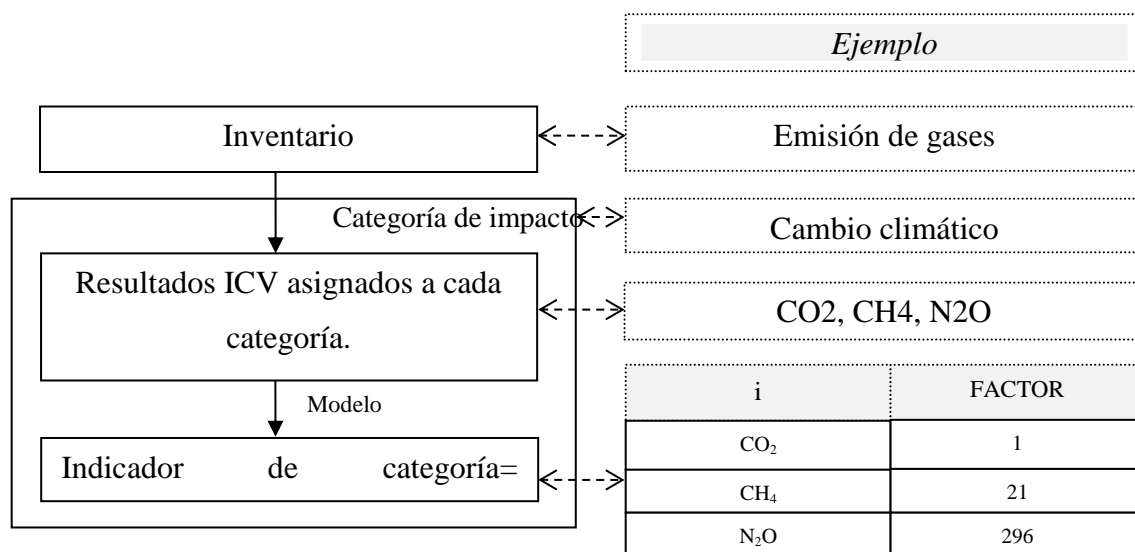


Figura 39. Fases de clasificación y caracterización en la EICV para una categoría de impacto con un ejemplo esquemático. Fuente: Aranda, A., & Zabalza, I. (2010)<sup>160</sup>.

<sup>158</sup> Usón, A. A., Usón, J. A. A., & Bribián, I. Z. (2010). *Ecodiseño y análisis de ciclo de vida*. Publicaciones Universidad de Zaragoza.

<sup>159</sup> De Schryver, A., Humbert, S., & Huijbregts, M. *Different visions on abiotic resource depletion*. Presentation, University Nijmegen, the Netherlands. Accedido el 30 marzo 2016, desde <http://www.lcaforum.ch/portals/0/df40/DF40-05%20Schryver-Resource%20Assessment.pdf>

<sup>160</sup> Aranda, A., & Zabalza, I. (2010). *Ecodiseño y análisis de ciclo de vida*. Universidad de Zaragoza.

Algunas de estas etapas son opcionales, habiendo otras obligatorias tal y como se muestra en la Tabla 7.

Obligatorio	Selección de las categorías de impacto, según metodología.
	Clasificación.
	Caracterización.
Opcional	Normalización.
	Valoración o ponderación.
	Análisis de la calidad de datos (ejemplo: análisis de sensibilidad).

Tabla 7. Elementos de la fase de Evaluación de Impacto.

#### 4.3.3.1. Metodologías.

Existen numerosas metodologías para realizar la evaluación de impacto. A continuación se presenta una enumeración de ellas. Se profundizará en las elegidas para el desarrollo de la presente tesis doctoral.

MÉTODOS DESARROLLADOS EN EUROPA	<b>CML-IA</b>
	ECOLOGICAL SCARCITY 2013
	EDIP 2003
	EPD (2013)
	EPS 2000
	IMPACT 2002+
	RECIPE
	ILCD 2011 MIDPOINT
MÉTODOS DESARROLLADOS EN NORTEAMÉRICA	BEES
	TRACI 2.1
MÉTODOS DE INDICADOR ÚNICO	CUMULATIVE ENERGY DEMAND
	CUMULATIVE EXERGY DEMAND
	ECOLOGICAL FOOTPRINT
	ECOSYSTEM DAMAGE POTENTIAL
	GREENHOUSE GAS PROTOCOL
	IMPACT 2002+
	IPCC 2013
	USETOX
MÉTODOS PARA CUANTIFICAR LA HUELLA HÍDRICA	BOULAY ET AL 2011 (HUMAN HEALTH)
	<b>BOULAY ET AL 2011 (WATER SCARCITY)</b>
	ECOLOGICAL SCARCITY 2006 (WATER SCARCITY)
	HOEKSTRA ET AL 2012 (WATER SCARCITY)
	MOTOSHITA ET AL 2011 (HUMAN HEALTH)
	PFISTER ET AL 2009 (ECO-INDICATOR 99)
	PFISTER ET AL 2009 (WATER SCARCITY)
	PFISTER ET AL 2010 (RECIPE)
DESACTUALIZADOS	CML 1992
	ECO-INDICATOR 95
	ECO-INDICATOR 99
	ECOPOINTS 97
	EDIP/UMIP 97
	IPCC 2001 GWP
	IPCC 2007
	EPD (2008)
	ECOLOGICAL SCARCITY 2006

Tabla 8. Clasificación de las metodologías de evaluación de ACV, aparecen resaltadas las que serán de aplicación en esta Tesis. Fuente: Elaboración propia con datos de PRé Consultants<sup>161</sup>.

<sup>161</sup> Goedkoop, M., Oele, M., de Schryver, A., Vieira, M., & Hegger, S. (2008). *SimaPro database manual methods library*. PRé Consultants, The Netherlands.

Cada metodología tiene sus propios indicadores o categorías de impacto. Existen metodologías de un único indicador, como puede ser IPCC 2013, la cual obtiene únicamente el Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés, Global Warming Potential) expresado en kg de CO<sub>2</sub> equivalente y siguiendo las directrices marcadas por el IPCC. Del mismo modo, existen metodologías con numerosos indicadores, estas son más recomendables ya que aportan más información con un único ACV.

A su vez las metodologías pueden tener indicadores en función del impacto que se origina o expresado de otro modo, el alcance de los mismos. A continuación se explican las diferencias entre indicadores endpoint y midpoint.

#### 4.3.3.2. Indicadores Midpoint. Indicadores Endpoint

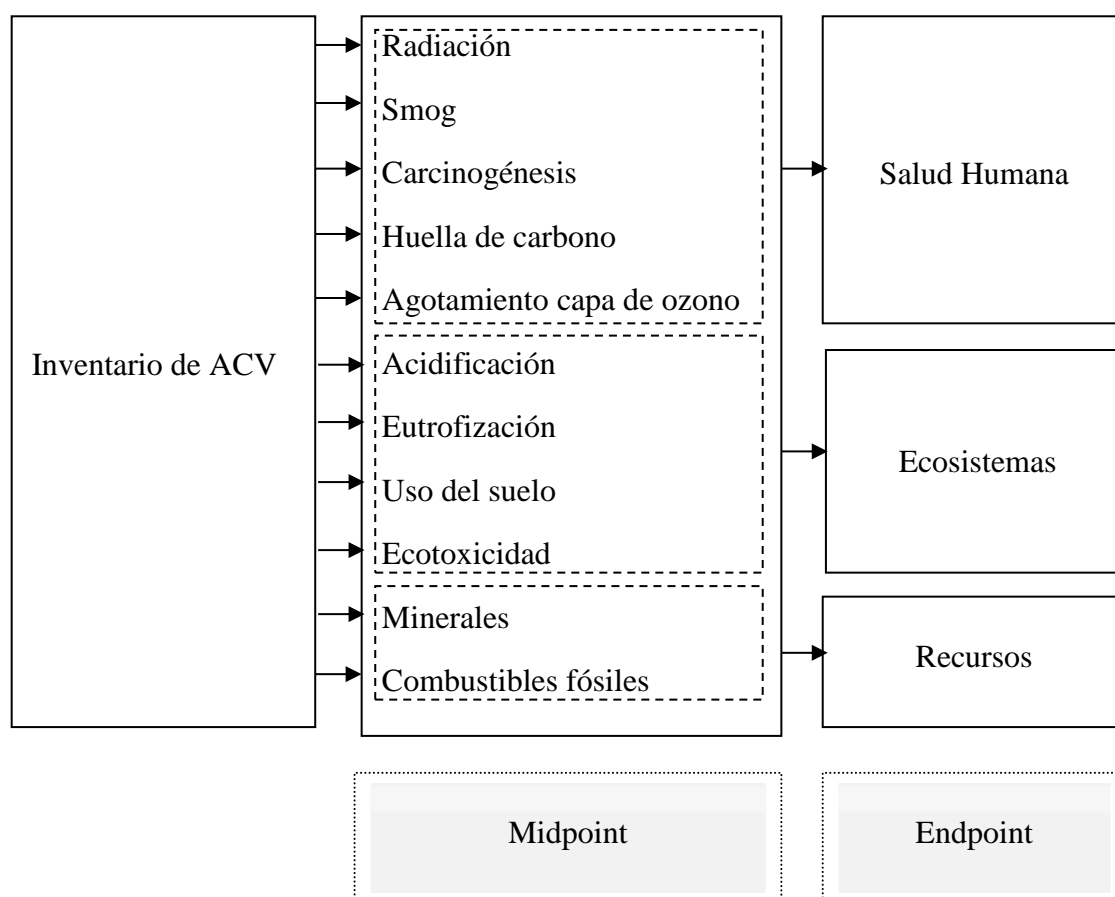


Figura 40. Representación esquemática de los indicadores midpoint y endpoint. Elaboración propia.

Los indicadores de los métodos de ACV pueden tener una distancia a un nivel objetivo, orientados al problema, en ese caso se denominan midpoint. Si bien tienen una aproximación al daño causado en ecosistemas, recursos y humanos, en ese caso se

denominan indicadores endpoint. Los midpoint se encuentran en medio de la cadena causa-efecto. Con el enfoque midpoint se reduce la complejidad y conlleva una mejor comunicación de resultados, este tipo de valores está más aceptado en la comunidad científica<sup>162</sup>.

Uno de los indicadores endpoint más usuales son los DALYs (Disability Adjusted Life Years, por sus siglas en inglés) que miden el daño sobre la salud humana, como una medida de años de vida que se pierden por el efecto en cuestión.

Para comprender el alcance de ambos sirva como ejemplo tener emisiones de CFC's en el inventario las cuales, debido a reacciones químicas, se puede cuantificar que producirán un agotamiento de la capa de ozono determinado. Esto sería una aproximación midpoint. Si se sigue adelante (endpoint) se puede concluir en que menos ozono producirá un incremento de rayos UVA y esto mayores causas de cáncer de piel, degradación de plásticos de PVC por la acción del sol o incluso daño en la vida marina.

El alcance midpoint aporta unos resultados más tangibles y reales mientras que los resultados endpoint pueden ser más fáciles de entender para un acercamiento enfocado a toma de decisiones.

#### **4.3.3.3. CML-IA**

En este epígrafe se describe más detalladamente el método CML puesto que será elegido para la evaluación de impacto, es decir, la obtención de resultados de la presente Tesis doctoral.

En 2001, un grupo de investigación del CML (Center of Environmental Science of Leiden University, en español, Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden) propuso un método con un conjunto de categorías de impacto así como las indicaciones para la caracterización de la etapa de evaluación de impacto.

El método CML-IA permite la normalización, pero no contempla ponderación<sup>163</sup>.

---

<sup>162</sup> Bare, J. (2011). *TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0*. Clean Technologies and Environmental Policy, 13(5), 687-696.

<sup>163</sup> Guinée, J. B. (2002). *Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards*. The international journal of life cycle assessment, 7(5), 311-313.

Las categorías de impacto que evalúa la metodología CML-IA tienen un enfoque midpoint, es decir, enfoque de distancia a nivel objetivo, orientado al problema. A continuación se describen las mismas.

#### 4.3.3.3.1. Agotamiento de recursos abióticos.

Esta categoría de impacto tiene que ver con la protección del bienestar humano, la salud humana y la salud del ecosistema. Está relacionada con la extracción de minerales y combustibles fósiles, debido a las entradas en el sistema.

Los bienes materiales del ser humano provienen de recursos naturales. El crecimiento de la población y el aumento del consumo evidencian el agotamiento de ellos.

El factor de potencial de agotamiento abiótico (ADP por sus siglas en inglés Abiotic Depletion Potential) se determina para cada extracción de minerales y combustibles fósiles en base a las reservas de concentración y la tasa de desacumulación. El ámbito geográfico de este indicador es a escala global.

Inicialmente<sup>164</sup>, se planteó el agotamiento de los recursos abióticos como un cociente entre lo extraído y las reservas. Se debía mejorar el indicador y posteriormente se introdujo el ratio de extracción.

Planteadas las cuestiones sobre qué tipo de reservas se consideran, económicas, De acuerdo con Guinée, Heijungs (1995)<sup>165</sup> un método basado en las últimas reservas de extracción es la mejor opción.

---

<sup>164</sup> Ansems, A. A. M., Eggels, P. G., van Duin, R., & GOEDE, H. D. (1992). *Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guide and Backgrounds*. CML, Leiden University, The Netherlands.

<sup>165</sup> Guinée, J. B., & Heijungs, R. (1995). *A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment*. *Environmental toxicology and chemistry*, 14(5), 917-925.

$$Agotamiento\ abi\acute{o}tico = \sum ADP_i \cdot m_i$$

Ecuación 8

$$ADP_i = \frac{DR_i}{(R_i)^2} \cdot \frac{(R_{ref})^2}{DR_{ref}}$$

Ecuación 9

Donde:

$ADP_i$  Potencial de agotamiento abi\acute{o}tico del recurso i,  $[kg_{Sb\ eq}/kg_{sustancia}]$ .

$m_i$  masa del recurso i, [kg].

$R_i$  reservas del recurso i, [kg].

$DR_i$  ratio de extracci\acute{o}n del recurso i, [kg/a\~no]

$R_{ref}$  reservas del recurso de referencia, antimonio, [kg]

$DR_i$  ratio de extracci\acute{o}n del recurso de referencia, [kg/a\~no]

El indicador resultante es expresado en kg del recurso de referencia, en este caso, antimonio, Sb.

Sustancia	ADP, $[kg_{Sb\ eq}/kg_{sustancia}]$
Antimonio, Sb	1
Azufre, S, en suelo	0,000358
Carb\acute{o}n, en suelo	0,00363
Cobre Cu, mineral	0,00194
Gas natural	0,32
Hierro Fe, mineral	8,43E-08
Magnesio Mn	3,73E-09
Manganeso Mn, mineral	0,0000138
Petr\acute{o}leo, en suelo	0,436
Plata Ag, mineral	1,84
Plomo Pb, mineral	0,0135

Tabla 9. Ejemplos de factores de agotamiento abi\acute{o}tico para la caracterizaci\acute{o}n de algunas sustancias.

Dependiendo de la referencia tomada, se tendr\acute>a un agotamiento de unos recursos abi\acute{o}ticos o bien otro. Se suelen obtener dos categor\xedas de impacto en este sentido, una referenci\`andolo al antimonio y obteniendo, por tanto,  $kg_{Sbeq}$  y otra de agotamiento de los combustibles f\acute>osiles, que se expresa en MJ.



Incorporar esta categoría de agotamiento de los recursos abióticos (combustibles fósiles) y expresarlo en MJ, proviene de la necesidad de aportar información relevante adicional sobre la cantidad de energía consumida por un sistema. Una aproximación común es agregar las formas de consumo de energía multiplicando la energía de las fuentes extraídas del medio ambiente por sus reservas de energías.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Agotamiento de recursos abióticos</b>
Inventario de Ciclo de Vida	Extracción de minerales y combustibles fósiles (kg, m <sup>3</sup> , MJ, etc).
Modelo de caracterización	Basado en el último volumen de reserva y ratio de la extracción.
Factor de caracterización	Potencial de agotamiento abiótico, ADP (kg <sub>Sb</sub> eq/kg <sub>sustancia</sub> )
Unidad del indicador	kg <sub>Sb</sub> eq

Tabla 10. Características de la categoría de impacto Agotamiento de recursos abióticos.

#### 4.3.3.3.2. Cambio climático.

Un objeto por el hecho de aumentar su temperatura, emite radiación electromagnética. A mayor temperatura, la energía aumenta, aumentando la frecuencia de esa radiación y/o disminuyendo la amplitud de onda. Este mismo suceso ocurre con nuestro planeta.

Aproximadamente dos tercios de la radiación solar (ultravioleta, UV), es absorbida por la superficie de la Tierra, el otro tercio es devuelto al espacio. Esa absorción de calor por parte del planeta hace que emita, a su vez, una radiación. Esta radiación, por sus características, es infrarroja (IR).

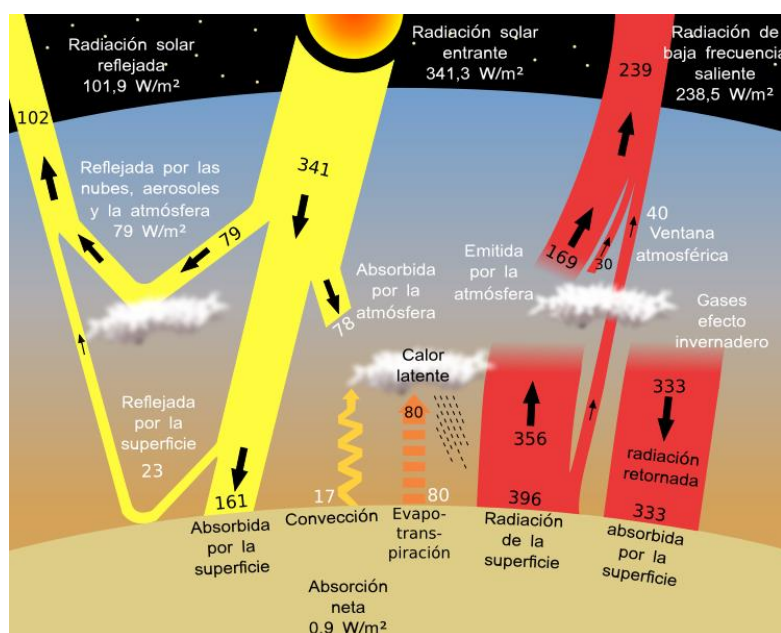


Figura 41. Esquema del balance anual de energía de la Tierra desarrollado por Trenberth, Fasullo y Kiehl<sup>166</sup> del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de los Estados Unidos en 2008. Se basa en datos del periodo de marzo de 2000 a mayo de 2004 y es una actualización de su trabajo publicado en 1997. La superficie de la Tierra recibe del Sol  $161 \text{ W/m}^2$  y del Efecto Invernadero de la Atmósfera  $333 \text{ W/m}^2$ , en total  $494 \text{ W/m}^2$ , como la superficie de la Tierra emite un total de  $493 \text{ W/m}^2$  ( $17+80+396$ ), supone una absorción neta de calor de  $0,9 \text{ W/m}^2$ , que en el presente está provocando el calentamiento de la Tierra.

La atmósfera recibe la radiación IR procedente de la superficie asumiéndola en parte (aumentando su temperatura) y remitiendo el resto en todas direcciones. Así pues, la atmósfera recibe radiación solar (UV) y atmosférica (IR). Es lo que la mantiene con las propiedades óptimas para la vida humana. Es el fenómeno conocido como efecto invernadero.

Alterar estas propiedades, tal y como se lleva haciendo desde la industrialización, puede provocar efectos adversos.

Tan solo en torno al 1% de los gases que componen la atmósfera son los que absorben la radiación terrestre anteriormente descrita (vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, hexafluoruro de azufre, etc). Son los llamados gases de efecto invernadero y, de manera natural, tienen la función de mantener la atmósfera en las condiciones óptimas para la vida humana. Es la variación en su concentración la que

<sup>166</sup> Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Kiehl, J. (2009). *Earth's global energy budget*. Bulletin of the American Meteorological Society, 90(3), 311-323.

está ocasionando problemas medioambientales. Esta variación en su concentración proviene, en su mayor medida, de la combustión de combustibles fósiles.

A continuación se presentan unas figuras con las que se puede comprobar cómo, por sus características electromagnéticas unos gases son capaces de absorber más o menos radiación, en unas u otras longitudes de onda. Se ve este fenómeno por medio de la transmitancia, mayores transmitancias significan absorciones mayores de radiación, por lo tanto mayores aumentos de temperatura. Con ello, se aprecia que será más problemático aumentar la concentración atmosférica de algunos gases. De ahí la base de los factores de potencial de calentamiento global que se definirán posteriormente.

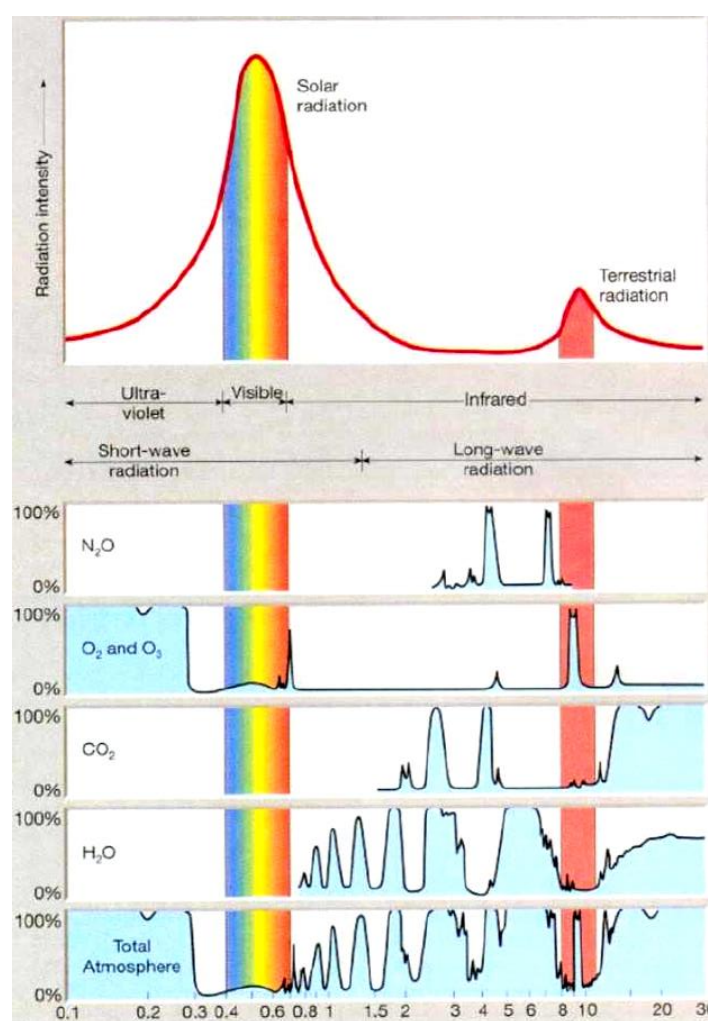


Figura 42. Radiación solar y terrestre. Transmitancia atmosférica (%), y gases absorbentes de radiación.

Fuente: Inzunza, J<sup>167</sup>.

<sup>167</sup> Inzunza, J. (2000). Meteorología descriptiva y aplicaciones en Chile. Universidad de Concepción, Chile.

En la Figura 42 se muestra la transmitancia de diversos gases en la atmósfera para diferentes longitudes de onda, se observa que el nitrógeno es mal absorbedor de radiación solar, el oxígeno y el ozono son buenos absorbedores de radiación ultravioleta en  $\lambda < 0,29 \mu\text{m}$ .

El vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) es el mayor absorbente atmosférico por su concentración y porque presenta diversas bandas de absorción entre 0,7 y los 8  $\mu\text{m}$ , además la absorción en la banda situada en 6  $\mu\text{m}$  puede llegar a ser hasta del 100 %. El  $\text{CO}_2$  es el principal responsable del mantenimiento de la temperatura de la atmósfera, al presentar la mayor banda de absorción en torno a los 15  $\mu\text{m}$ <sup>168</sup>.

Se debe distinguir por tanto el efecto invernadero natural, del Calentamiento Global producido por el hombre, fruto de su actividad industrial. Al igual que hay que diferenciar la importancia que tiene emitir algunos gases.

Por ejemplo, a pesar de que cada molécula de metano es mucho más eficaz como generadora de efecto invernadero que cada una de  $\text{CO}_2$ , la cantidad de dióxido de carbono presente en la atmósfera es más de doscientas veces la de metano en volumen, de modo que el  $\text{CO}_2$  es muchísimo más significativo que el metano como responsable de este efecto.

Así pues, en lo que a caracterización de ciclo de vida se refiere, se define esta categoría de impacto como la cuantificación del efecto que producen las emisiones procedentes de la actividad humana sobre el forzamiento radiativo (cualquier cambio en la radiación, calor, entrante o saliente de un sistema climático) de la atmósfera.

La mayoría de estas emisiones varían el forzamiento radiativo, causando el aumento de la temperatura de la superficie de la Tierra. Es lo que popularmente se conoce como efecto invernadero o Calentamiento Global.

El cambio climático puede provocar efectos adversos sobre los ecosistemas, la salud humana y los bienes materiales.

---

<sup>168</sup> Pinilla Ruiz, C. *Interacción de la radiación con la atmósfera*. Universidad de Jaén. Departamento de Ingeniería Cartográfica. Accedido el 15 de junio de 2016 desde <http://coello.ujaen.es/asignaturas/teledeteccion/tel/archivos/4.pdf>

En la publicación de Hijungs et al. (1992)<sup>169</sup> los factores de Potencial Calentamiento Global (GWP por sus siglas en inglés, Global Warming Potential) fueron usados para la caracterización evaluando y agregando las intervenciones de las categorías de impacto integrados en el tiempo.

$$\text{Cambio climático} = \sum GWP_i \cdot m_i$$

Ecuación 10

$$GWP_{Ti} = \frac{\int_0^T a_i \cdot c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot c_{CO_2}(t) dt}$$

Ecuación 11

Donde:

$GWP_i$  Potencial calentamiento global de i, [kg CO<sub>2</sub> eq/kg sustancia].

$m_i$  masa de gas de efecto invernadero i, [kg].

$a_i$  forzamiento radiativo por unidad de aumento de concentración de gas de efecto invernadero i, [W·m<sup>-2</sup>·kg<sup>-1</sup>]

$c_i(t)$  concentración de gas de efecto invernadero i en tiempo t, [kg·m<sup>-3</sup>]

T tiempo durante el cual la integración es ejecutada, [años]

Los valores correspondientes de dióxido de carbono están incluidos en el denominador de la ecuación<sup>170 171</sup>. GWP es una medida de la contribución potencial de una sustancia al cambio climático e incorpora consideraciones de destino, indicando los efectos potenciales climáticos de cada emisión por el hecho de depender no solo de la absorción de calor atmosférico sino también de su distribución en el tiempo.

Para comparar los impactos de emisiones de diferentes gases de efecto invernadero, cada uno tiene asignado un índice o factor de Potencial de Calentamiento Global, que

<sup>169</sup> Heijungs, R., Guinée, J. B., Huppes, G., Lankreijer, R. M., Udo de Haes, H. A., Wegener Sleeswijk, A., & De Goede, H. P. (1992). *Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds*. Institute of Environmental Sciences. CML, Leiden openaccess.

<sup>170</sup> Houghton, J. T., Callander, B. A., & Varney, S. K. (1992). *The supplementary report to the IPCC scientific assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.

<sup>171</sup> Jäger, J & H.L. Ferguson (1991) *Climate change: science, impacts and policy*. Cambridge University Press, Cambridge.

expresa el ratio entre el aumento de la absorción de la radiación infrarroja debido a emisiones instantáneas de 1 kg de esa sustancia con respecto a un emisión igual de CO<sub>2</sub>

El modelo de caracterización que utiliza CML-IA es el desarrollado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para el desarrollo de factores de caracterización. Los resultados se expresan para el horizonte temporal de 100 años (GWP100)<sup>172</sup>, en kg de dióxido de carbono equivalentes. Existen otros horizontes temporales más cortos, por ejemplo a 20 años, GWP20, o más largos, a 500 años, GWP500. En la presente tesis doctoral se tomará el horizonte 100 años, ya que es el que CML implementa.

Sustancia		GWP20	GWP100	GWP500
Dióxido de carbono,	CO <sub>2</sub>	1	1	1
Metano,	CH <sub>4</sub>	72	25	7.6
Óxido de nitrógeno,	N <sub>2</sub> O	289	298	153
CFC-11,	CCl <sub>3</sub> F	6.730	4.750	1.620
Halón 1301,	CBrF <sub>3</sub>	8.480	7.140	2.760
Tetrafluoruro de carbono,	CF <sub>4</sub>	5.210	7.390	11.200

Tabla 11. Ejemplos de factores de potencial de calentamiento global para la caracterización de algunas sustancias y tres horizontes temporales, [kg CO<sub>2</sub> eq/kg sustancia]

El ámbito geográfico de este indicador es a escala global.

Categoría de impacto	Cambio climático
Inventario de Ciclo de Vida	Cantidad de gases de efecto invernadero (kg)
Modelo de caracterización	Modelo de línea de base de 100 años del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
Factor de caracterización	Potencial de calentamiento global, GWP (kgCO <sub>2</sub> eq/kg <sub>sustancia</sub> ).
Unidad del indicador	kgCO <sub>2</sub> eq

Tabla 12. Características de la categoría de impacto Cambio Climático.

<sup>172</sup> CHANGE, IPCC Climate. *Mitigation of climate change*. Summary for Policymakers, (2007), p. 10.

## 4.3.3.3.3. Agotamiento del ozono estratosférico.

Aproximadamente el 90% del ozono presente en la atmósfera se encuentra en la estratosfera y el otro 10% en la troposfera. Es el ozono estratosférico es lo que se conoce habitualmente como la capa de ozono<sup>173</sup>.

En la estratosfera, de forma natural, el ozono está en continua formación y destrucción siguiendo una serie de reacciones llamadas reacciones de Chapman<sup>174</sup>.

$O_2 + h\nu (< 240 \text{ nm}) \rightarrow O + O$	Formación
$O + O_2 \rightarrow O_3$	
$O_3 + h\nu (< 320 \text{ nm}) \rightarrow O + O_2$	Destrucción
$O + O_3 \rightarrow O_2 + O_2$	

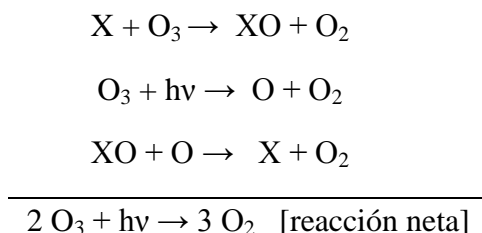
Tabla 13. Reacciones (no catalíticas) de Chapman de formación-destrucción del ozono estratosférico.

Se establece un equilibrio entre la formación y la destrucción de ozono, en el que la concentración de este oscila entre 0,03 y 0,08 ppm (partes por millón), alcanzando el máximo valor a unos 25 km de la superficie terrestre<sup>175</sup>.

Tal y como se aprecia en la

Figura 42 el oxígeno y el ozono son buenos absorbedores de radiación ultravioleta en  $\lambda < 0,29 \mu\text{m}$ , bloqueando entre el 93% y el 99% la radiación UV de alta frecuencia proveniente del sol (UV-B), haciendo de la ozonósfera un eficaz filtro que nos protege de la peligrosa radiación ultravioleta.

La actividad humana rompe el equilibrio de Chapman, destruyendo el ozono. Este proceso puede resumirse en las siguientes reacciones:



<sup>173</sup> Fahey, D. W. (2002). *Veinte preguntas y Respuestas sobre la Capa de Ozono*. Evaluación Científica del Agotamiento de Ozono.

<sup>174</sup> Chapman, S. (1930). *A theory of upper-atmospheric ozone*. Edward Stanford.

<sup>175</sup> Chicón, L. *Ozono atmosférico. Química del ozono*. Accedido el 5 abril 2016, desde <http://www.ambientis.org/ozono.pdf>

Donde X representa especies químicas (fundamentalmente radicales libres) capaces de catalizar la destrucción de ozono. Estas sustancias pueden ser originarias de fenómenos naturales como el óxido nítrico (NO) o los radicales hidroxilo ( $\text{HO}^\cdot$ ), aunque las más comunes son las de origen antropogénico como el bromuro de metilo ( $\text{BrCH}_3$ ), el tetracloruro de carbono ( $\text{CCl}_4$ ), las sustancias halogenadas o los CFCs. Las sustancias que contienen cloro y bromo reactivos destruyen el ozono estratosférico en ciclos catalíticos de dos o más reacciones. De esta forma, un solo átomo de cloro o bromo puede destruir cientos de moléculas de ozono antes de reaccionar con otra sustancia, rompiendo el ciclo. Así, una pequeña cantidad de cloro o bromo reactivo tiene gran impacto en la capa de ozono.

El agotamiento del ozono estratosférico es la categoría de impacto que representa, como su nombre indica, la disminución del espesor de la capa de ozono estratosférico como resultado de las emisiones antropogénicas. Esta disminución provoca que una mayor fracción solar de radiación UV-B alcance la superficie terrestre, con los efectos nocivos sobre la salud humana, ecosistemas terrestres y acuáticos, ciclos bioquímicos y recursos materiales que ello conlleva.

El concepto de potencial agotamiento de ozono (ODP por sus siglas en inglés, Ozone Depletion Potential) fue introducido por primera vez en 1988 por Wuebbles<sup>176</sup>.

---

<sup>176</sup> Wuebbles, D.J. (1988). *Relative effects on stratospheric ozone of halogenated methanes and ethanes of social and industrial interest*. UNEP, Nairobi (Conference 19-10-1988)



$$\text{Agotamiento de ozono} = \sum ODP_i \cdot m_i$$

Ecuación 12

$$ODP_i = \frac{d[O_3]_i}{d[O_3]_{CFC-11}}$$

Ecuación 13

Donde:

$ODP_i$  Factor de potencial agotamiento de ozono de la sustancia  $i$ , [kg CFC-11 eq/kg sustancia].

$m_i$  masa de gas de efecto invernadero  $i$ , [kg].

$d[O_3]_i$  representa el cambio en la columna de ozono estratosférico en el estado de equilibrio debido a las emisiones anuales de sustancia  $i$ , [kg/año].

$d[O_3]_{CFC-11}$  el cambio en esta columna en el estado de equilibrio debido a las emisiones anuales de CFC-11, [kg/año].

El agotamiento de ozono es el indicador resultante y se expresa en kg de CFC-11 equivalentes. Se deduce que un ODP basado en un flujo de emisión [kg/año] también aporta una buena indicación a los cambios en la columna de ozono debido a emisiones instantáneas [kg] a la atmósfera.

Aunque el concepto de ODP se asemeja al de GWP, existe una diferencia notable, los ODPs son calculados para estados estables y los GWPs para varios diferentes horizontes temporales (el más común es GWP100 pero existen otros como GWP50).

Los ODPs describen el impacto que produce en la capa de ozono de una emisión de sustancia comparado con el impacto de la misma emisión de CFC-11. Es un modelo recomendado por Nichols<sup>177</sup> y Hauschild<sup>178</sup> para situaciones en las que el lapso de

<sup>177</sup> Nichols, P., Hauschild, M. Z., Potting, J. M. B., & White, P. (1996). *Impact assessment of non toxic pollution in life cycle assessment*. Towards a methodology for life cycle impact assessment.

<sup>178</sup> Hauschild, M. Z. (1997). *Environmental assessment of products: volume 2: scientific background* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.

tiempo considerado es infinito. En otros casos menores, se recomienda modelar los ODP según la dependencia de tiempo de Salomon y Albriton, con un enfoque empírico. Lo más aceptado es modelarlos con lapso infinito<sup>179</sup>.

Las aportaciones a esta categoría provienen de las salidas del sistema, y son a escala mundial. El modelo de caracterización es el desarrollado por la World Meteorological Organization (WMO) en español, Organización Meteorológica Mundial. Comenzaron sus estudios en 1989<sup>180</sup> y hasta la fecha se encuentran numerosas publicaciones que actualizan la anterior<sup>181</sup>.

Así pues, en CML, el ámbito geográfico de este indicador es a escala global. El lapso de tiempo es infinito.

Sustancia		ODP
CFC-11	CFC1 <sub>3</sub>	1
Bromuro de metilo	CH <sub>3</sub> Br	0,7
Halon 1201. Bromodifluorometano	CHBrF <sub>2</sub>	1,4
Halon 1301. Bromotrifluorometano	CBrF <sub>3</sub>	17,2
Tetracloruro de carbono	CF <sub>4</sub>	1,2

Tabla 14. Ejemplos de factores de potencial agotamiento de ozono de la sustancia i, para la caracterización de algunas sustancias, [kg CFC-11 eq/kg sustancia]

Categoría de impacto	Agotamiento del ozono estratosférico
Inventario de Ciclo de Vida	Emisión de gases de agotamiento del ozono estratosférico al aire, kg
Modelo de caracterización	Modelo desarrollado por la Organización Meteorológica Mundial-
Factor de caracterización	Potencial agotamiento de ozono de la sustancia, ODP(kg CFC-11eq / kg <sub>sustancia</sub> )
Unidad del indicador	Kg CFC-11 eq

Tabla 15. Características de la categoría de impacto Agotamiento del ozono estratosférico.

<sup>179</sup> Wenzel, H., Hauschild, M. Z., & Alting, L. (2000). *Environmental Assessment of Products: Volume 1: Methodology, tools and case studies in product development* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.

<sup>180</sup> World Meteorological Organization, WMO, (1989) *Scientific assesment of stratospheric ozone*. Volume I; report n.20 WMO/UNEP, Geneva.

<sup>181</sup> World Meteorological Organization, WMO, (2014) *Scientific assesment of ozone depletion*. Global Ozone Research and Monitoring Project -Report no. 56. Geneva

## 4.3.3.3.4. Toxicidad Humana

Esta categoría cuantifica los efectos de sustancias tóxicas en el ser humano.

Una gran variedad de métodos de caracterización han sido desarrollados para la categoría toxicidad humana cuyos factores de caracterización se denominan Potenciales de Toxicidad Humana (HTP, por sus siglas en inglés: Human Toxicity Potentials). CML los toma de USES-LCA<sup>182</sup>, que describe el destino, la exposición y los efectos de las sustancias tóxicas para un horizonte de tiempo infinito.

USES LCA tiene varias actualizaciones, en la primera de ellas, USES 1.0<sup>183</sup> se sentaron las bases. Se divide el medio ambiente en cuatro compartimentos: aire, agua, suelo agrícola y suelo industrial. Las sustancias serán emitidas a estos compartimentos. A su vez, para la toxicidad humana, se analizan seis rutas de exposición: aire, pescado, agua, cultivos, carne y leche.

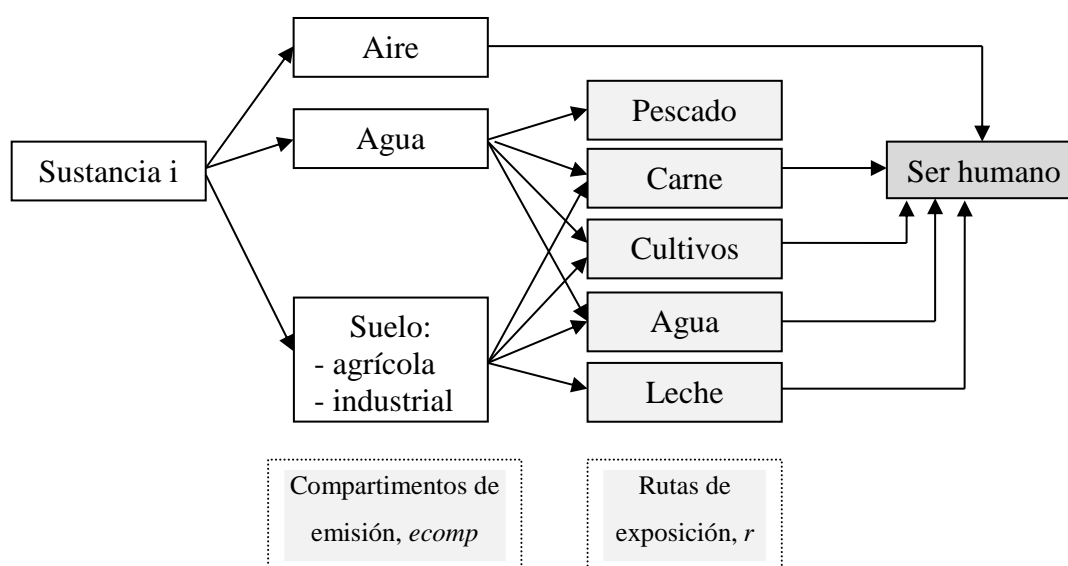


Figura 43. Rutas de exposición identificadas en USES 1.0. Fuente: elaboración propia con datos de Guinée, J. B.<sup>184</sup>.

<sup>182</sup> Van Zelm, R., Huijbregts, M. A., & van de Meent, D. (2009). *USES-LCA 2.0—a global nested multi-media fate, exposure, and effects model*. The international journal of life cycle assessment, 14(3), 282-284.

<sup>183</sup> RIVM, V. WVC (1994). *Uniform System for the Evaluation of Substances (USES), version 1.0*. National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM), Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), Ministry of Welfare, Health and Cultural Affairs (WVC). The Hague, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. Distribution, (11144/150).

<sup>184</sup> Guinée, J. B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., De Koning, A., & De Bruijn, H. (2001). *Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Parts 1 and 2*. Ministry of

$$Toxicidad\ humana = \sum_i \sum_{ecomp} m_{i,ecomp} \cdot HTP_{i,ecomp}$$

Ecuación 14

Donde,

$m_{i,ecomp}$  masa de sustancia i, emitida al compartimento de emisión, ecomp [kg].

$HTP_{i,ecomp}$  Potencial de Toxicidad humana de la sustancia i emitida al compartimento de emisión, ecomp [-].

La Ecuación 14 también puede ser escrita, teniendo en cuenta las rutas de emisión, r, como:

$$Toxicidad\ humana = \sum_i \sum_{ecomp} m_{i,ecomp} \cdot [HTP_{i,ecomp,r1} + HTP_{i,ecomp,r2} + \dots]$$

Ecuación 15

USES 1.0 solo consideraba una escala continental, en actualizaciones siguientes<sup>185</sup> se da la posibilidad de de escalarlo según una población, introduciendo el factor  $N_s$ , densidad de población.

$$HTP_{i,ecomp} = \frac{\sum_r \sum_s PDI_{i,ecomp,r,s} \cdot E_{i,r} \cdot N_s}{\sum_r \sum_s PDI_{aire,1,4-diclorobenceno,r,s} \cdot E_{aire,1,4-diclorobenceno,r} \cdot N_s}$$

Ecuación 16

Donde,

$PDI_{i,ecomp,r,s}$  es el consumo diario previsto vía exposición en la ruta r, en la escala s, de la sustancia i emitida al compartimento ecomp. (día<sup>-1</sup>)

$E_{i,r}$  Factor efecto, representa el impacto toxicológico de la sustancia i, se refiere al consumo diario aceptado vía r (inhalación o ingestión) (día)

En el denominador se presenta la sustancia de referencia, el 1,4 diclorobenceno, en aire.

---

housing, spatial planning and environment (VROM) and centre of environmental science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands.

<sup>185</sup> Van Zelm, R., Huijbregts, M. A., & van de Meent, D. (2009). *USES-LCA 2.0—a global nested multi-media fate, exposure, and effects model*. The international journal of life cycle assessment, 14(3), 282-284.

Para cada sustancia tóxica los HTP se expresan como kg equivalentes de 1,4-diclorobenceno/kg de sustancia.

El ámbito geográfico de este indicador determina el destino de una sustancia y puede variar entre la escala local y global.

Sustancia		HTP
Arsénico	As	9.000
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0,012
Cadmio	Cd	19.000
Cobalto	Co	129.000
Cobre	Cu	145
Cromo	Cr III, Cr VI	3.700
Estaño	Sn	9
Formaldehído	CH <sub>2</sub> O	0,0099
Mercurio	Hg	46.000
Monóxido de carbono	CO	0,00014
Níquel	Ni	370

Tabla 16. Ejemplos de factores de potencial Toxicidad humana de la sustancia i, para la caracterización de algunas sustancias, [kg 1,4 diclorobenceno /kg sustancia]

Categoría de impacto	Toxicidad humana
Inventario de Ciclo de Vida	Emisiones de sustancias tóxicas al medio (kg)
Modelo de caracterización	USES 2.0.
Indicador de categoría	Ingesta diaria aceptable
Factor de caracterización	Potencial de toxicidad humana, HTP (kg 1.4-diclorobenceno-eq /kg)
Unidad del indicador	Kg 1.4-diclorobenceno-eq

Tabla 17. Características de la categoría de impacto Toxicidad humana.

#### 4.3.3.3.5. Ecotoxicidad Terrestre

Esta categoría caracteriza los impactos de las sustancias tóxicas en los ecosistemas terrestres.

Existen diversos métodos que modelizan esta categoría, una vez más, al igual que en toxicidad humana, CML toma el modelo creado por Guinée et al. (1996)<sup>186</sup>, que es el USES LCA.

<sup>186</sup> Guinée, J. B., Heijungs, R., Van Oers, L. F., Wegener Sleeswijk, A., Van de Meent, D., Vermeire, T., & Rikken, M. (1996). *USES-Uniform System for the Evaluation of Substances: Inclusion of Fate in LCA Characterisation of Toxic Releases Applying USES 1.0*. International Journal of Life Cycle Assessment, 1, 133-138.

$$Ecotoxicidad\ terrestre = \sum_i \sum_{ecompe} m_{i,ecompe} \cdot TETP_{i,ecompe}$$

Ecuación 17

Donde,

$m_{i,ecompe}$  masa de sustancia i, emitida al compartimento de emisión, ecomp [kg].

$TETP_{i,ecompe}$  Potencial de Ecotoxicidad terrestre de la sustancia i emitida al compartimento de emisión, ecomp [-].

$$TETP_{i,ecompe} = \frac{PECsuelo\ agrícola_{i,ecompe} \cdot E_{terr,i}}{PECsuelo\ agrícola_{1,4-diclorobenceno} \cdot E_{terr,1,4-diclorobenceno}}$$

Ecuación 18

Donde,

$PECsuelo\ agrícola_{i,ecompe}$  concentración de sustancia i en el suelo agrícola debida a la emisión al compartimento ecomp. [kg/m<sup>3</sup>]

$E_{terr,i}$  Factor efecto, representa el impacto toxicológico de la sustancia i sobre los ecosistemas terrestres (terr), se refiere al consumo diario aceptado vía r (inalación o ingestión) [kg/m<sup>3</sup>]

En el denominador se presentan estos parámetros pero para la sustancia de referencia, el 1,4 diclorobenceno.

La ecotoxicidad terrestre se expresa en kg de 1,4-diclorobenceno equivalentes. Para un horizonte temporal infinito y una escala global local o continental.

Sustancia		TETP
Arsénico	As	0,75
Cadmio	Cd	3,14
Cobalto	Co	0,08
Cobre	Cu	0,14
Cromo	Cr III, Cr VI	0,08
Mercurio	Hg	5,94
Níquel	Ni	0,35

Tabla 18. Ejemplos de factores de potencial Ecotoxicidad Terrestre de la sustancia i, para la caracterización de algunas sustancias, [kg<sub>1,4 diclorobenceno</sub> /kg<sub>sustancia</sub>]

<b>Categoría de impacto</b>	Ecotoxicidad Terrestre
Inventario de Ciclo de Vida	Emisiones de sustancias toxicas al medio (kg)
Modelo de caracterización	USES 2.0.
Indicador de categoría	Impacto toxicológico sobre los ecosistemas terrestres
Factor de caracterización	Potencial ecotoxicidad terrestre, TETP (kg 1,4-diclorobenzeno-eq /kg)
Unidad del indicador	Kg 1,4-diclorobenzeno-eq

Tabla 19. Características de la categoría de impacto Ecotoxicidad Terrestre.

#### 4.3.3.3.6. Formación de oxidación fotoquímica

La oxidación fotoquímica es la formación de sustancias reactivas (principalmente ozono) por la acción de la luz solar sobre ciertos contaminantes que se encuentran en el aire. Estas sustancias son perjudiciales para la salud y los ecosistemas humanos y también pueden dañar los cultivos.

La formación de ozono troposférico es diferente a la del estratosférico puesto que la radiación incidente en esta capa de la atmósfera es otra que en la troposfera. El ozono, en este caso, se forma a partir de ciertos precursores (óxidos de nitrógeno; y COVs - compuestos orgánicos volátiles, como el formaldehído), contaminantes provenientes de la actividad humana. El ozono es nocivo para el ser humano, el límite recomendado de exposición de ozono es de 0.1ppm.

La luz solar genera radicales libres iniciadores de los procesos químicos de formación una neblina visible que se denomina smog fotoquímico.

Los principales contaminantes de smog son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y algunos hidrocarburos ligeros no quemados liberados por los automóviles.

Los productos finales de estas reacciones son ozono (O<sub>3</sub>), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), peróxido de hidrogeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), peróxido de nitratoacetilo (PAN) y compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés). Todos estos compuestos dan lugar a una atmósfera irritante, nociva y en algunos casos tóxica. Suele presentar color anaranjado, causado por el NO<sub>2</sub>.

Este problema es el comúnmente llamado smog de verano. El smog de invierno, que es el fenómeno por el cual el humo de calderas, etc. se mezcla con la neblina, se encuentra fuera del alcance de esta categoría; forma parte de la categoría toxicidad humana.

La creación de ozono fotoquímico para la emisión de sustancias a la atmósfera se calcula con el modelo de trayectoria de UN-ECE<sup>187</sup> (el cual incluye el destino). Se representa por medio del factor Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP, por sus siglas en inglés), el cual se expresa en kg equivalentes de etileno / kg de emisiones. El lapso de tiempo es de 5 días y la escala geográfica varía entre la escala local y continental.

El modelo UN-ECE define el POCP de una sustancia como el ratio entre el cambio en la concentración de ozono debido a la emisión de esa sustancia y el cambio en la concentración de ozono debido a la emisión de etileno.

---

<sup>187</sup> UN-ECE, (1991) *Draft Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution Concerning the Control of Emissions of Volatile Organic Compounds or their Transboundary Fluxes*. UN-ECE Document EB-AIR/R.54.



*Formación de oxidación fotoquímica*

$$= \sum POCP_i \cdot m_i$$

Ecuación 19

$$POCP_i = \frac{a_i/b_i}{a_{C_2H_4}/b_{C_2H_4}}$$

Ecuación 20

Donde:

$POCP_i$  Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico de la sustancia i, [kg  $C_2H_4$ /kg sustancia].

$m_i$ , masa de la sustancia i emitida, [kg].

$a_i$ , representa el cambio en la concentración de debido a la emisión de i

$b_i$ , la emisión integrada de sustancia i hasta ese momento ozono estratosférico en el estado de equilibrio debido a las emisiones anuales de sustancia i, [kg/año].

El denominador contiene estos mismos parámetros pero para la sustancia de referencia, etileno,  $C_2H_4$ .

La formación de oxidación fotoquímica se mide en kg de etileno,  $C_2H_4$ , equivalentes.

Sustancia		POCP
Acetaldehído	$C_2H_4O$	0,527
Acetileno	$C_2H_2$	0,168
Acetona	$C_3H_6O$	0,178
Benzeno	$C_6H_6$	0,189
Butano	$C_4H_{10}$	0,41
Buteno	$C_4H_8$	0,959
Etano	$C_2H_6$	0,082
Etanol	$C_2H_6O$	0,268
Etileno	$C_2H_4$	1
Metano	$CH_4$	0,007
Metanol	$CH_3OH$	0,123
Propano	$C_3H_8$	0,42
Propileno	$C_3H_6$	1,03
Tolueno	$C_7H_8$	0,563

Tabla 20.. Ejemplos de factores de Potencial Creación de Ozono Fotoquímico, para la caracterización de algunas sustancias, [kg  $C_2H_4$ /kg sustancia]

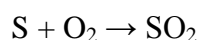
Categoría de impacto	Formación de oxidación fotoquímica
Inventario de Ciclo de Vida	Emisión de sustancias al aire (kg)
Modelo de caracterización	Modelo de trayectorias de UN-ECE
Indicador de categoría	Formación de ozono troposférico
Factor de caracterización	Potencial de creación de ozono fotoquímico POCP (kg etileno-eq/kg)
Unidad del indicador	kg etileno-eq

Tabla 21. Características de la categoría de impacto Formación de oxidación fotoquímica.

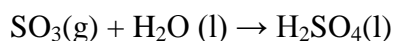
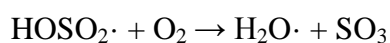
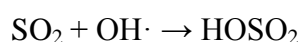
## 4.3.3.3.7. Acidificación

Los contaminantes atmosféricos como el humo de las industrias, automóviles, centrales térmicas o calefacciones, se combinan con la humedad del aire, formando ácido sulfúrico, y ácido nítrico. Estos compuestos modifican la composición de las gotas de agua de la atmósfera, que al precipitarse originan la lluvia ácida<sup>188</sup>.

Combustibles fósiles como carbón y petróleo contienen cantidades variables de azufre, suelen ser superiores al 1%. Cuando se produce la combustión de éstos, el azufre se oxida a dióxido de azufre:



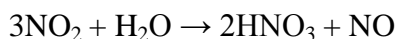
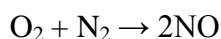
El  $\text{SO}_2$  gas puede reaccionar con el radical hidroxilo en las siguientes reacciones. Posteriormente, el  $\text{SO}_3$ , en contacto con la humedad atmosférica,  $\text{H}_2\text{O}$ , origina ácido sulfúrico.



En cuanto a la formación de los óxidos de nitrógeno, una de las fuentes más importantes son los motores de aviones y automóviles, en los cuales se alcanzan temperaturas muy elevadas.

<sup>188</sup> Likens, G. E., Wright, R. F., Galloway, J. N., & Butler, T. J. (1979). *Acid rain*. Sci. Am.;(United States), 241(4).

El NO se forma por reacción entre el oxígeno y el nitrógeno atmosféricos a alta temperatura. Este NO se oxida con el oxígeno atmosférico, y reacciona con el agua formando ácido nítrico, el cual se disuelve en el agua.



Las sustancias acidificantes causan una amplia gama de impactos sobre el suelo, el agua subterránea, agua superficial, los organismos, los ecosistemas y los materiales (edificios). Los factores caracterización en esta categoría de impacto se denominan Acidificación Potencial (AP), están definidos para las emisiones a la atmósfera y se calculan con una adaptación del modelo RAINS 10<sup>189</sup>, que describe el destino y la deposición de sustancias acidificantes.

$$\text{Acidificación} = \sum AP_i \cdot m_i$$

Ecuación 21

$$AP_i = \frac{\eta_i}{\eta_{\text{SO}_2}}$$

Ecuación 22

Donde:

$AP_i$  Factor de Acidificación Potencial de la sustancia i, [kg SO<sub>2</sub> eq/kg sustancia].

$m_i$ , masa de la sustancia i, [kg].

$\eta_i$  representa el número de iones H<sup>+</sup> que potencialmente pueden ser producidos por kg de sustancia i, [mol/kg]

$\eta_{\text{SO}_2}$ , el número de iones H<sup>+</sup> producidos por kg de SO<sub>2</sub>. emisiones anuales de sustancia i, [kg/año].

<sup>189</sup> Kelly, J. A. (2006). *An overview of the RAINS Model*. Environmental Protection Agency.

AP se expresa como kg SO<sub>2</sub> equivalentes / kg de sustancia, [-] La acidificación, por tanto se expresa en kg de SO<sub>2</sub> equivalentes. El lapso de tiempo es infinito y la escala geográfica varía entre la escala local y escala continental.

Sustancia		AP
Ácido Clorhídrico	HCl	0,02074
Ácido fluorhídrico	HF	0,05
Ácido sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	0,059
Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,020
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	0,059
Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	0,022

Tabla 22. Ejemplos de factores de Acidificación Potencial global para la caracterización de algunas sustancias, [kg SO<sub>2</sub> eq/kg sustancia]

El ámbito geográfico de este indicador es a escala global.

Categoría de impacto	Acidificación
Inventario de Ciclo de Vida	Emisión de sustancias adificantes, kg
Modelo de caracterización	Modelo RAINS10, desarrollado por IIASA
Factor de caracterización	Acidificación Potencial AP (kg SO <sub>2</sub> -eq /kg )
Unidad del indicador	kg SO <sub>2</sub> -eq

Tabla 23. Características de la categoría de impacto Acidificación.

## 4.3.3.3.8. Eutrofización

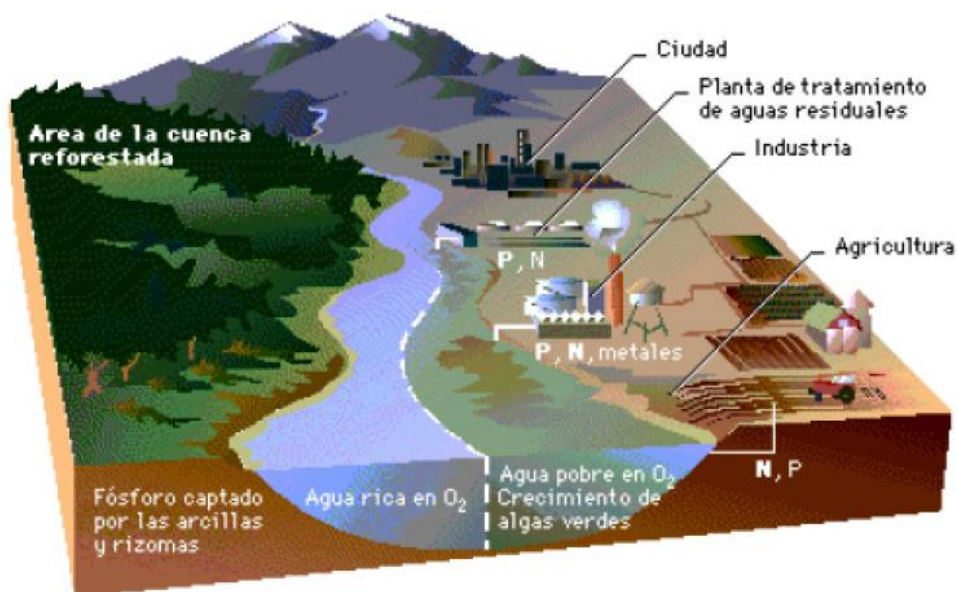


Figura 44. Representación del movimiento de los nutrientes hacia una cuenca fluvial. Fuente: Alfaro, P. (2004)<sup>190</sup>.

La eutrofización es el resultado del enriquecimiento excesivo de nutrientes en el medio.

Esta categoría, eutrofización (también conocida como nutrificación), cubre todos los impactos debidos a los niveles excesivos de macronutrientes en el medio ambiente causados por las emisiones de al aire, agua y suelo. Los macronutrientes más importantes son el nitrógeno (N) y el fósforo (P). Los altos niveles de ellos pueden causar alteraciones en la composición de los ecosistemas, tanto acuáticos como terrestres, por sobreproducción de biomasa (microalgas verdes). Además, estos altos niveles, pueden modificar las condiciones del agua haciéndola no apta para el consumo humano. En los ecosistemas acuáticos este incremento de biomasa, desemboca en una depresión de los niveles de oxígeno debido al consumo del mismo por la descomposición de la biomasa (medido como DBO, demanda biológica de oxígeno).

<sup>190</sup> Alfaro, P. (2004). *Estudio de los procesos de contaminación difusa y de los riesgos de eutrofización en los embalses de Portodemouros (cuenca del Ulla) y Fervenza (cuenca del Xallas)* (Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela).

$$Eutrofización = \sum EP_i \cdot m_i$$

Ecuación 23

$$EP_i = \frac{v_i/M_i}{v_{ref}/M_{ref}}$$

Ecuación 24

Donde:

$EP_i$  Factor de Eutrofización Potencial de la sustancia i, [kg PO<sub>43</sub>, eq/kg sustancia].

$m_i$ , masa de la sustancia i, [kg].

$v_i$  contribución potencial a eutrofización de un mol de sustancia i, [mol/kg].

$v_{ref}$  contribución potencial a eutrofización de un mol de sustancia ref (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) [mol/kg].

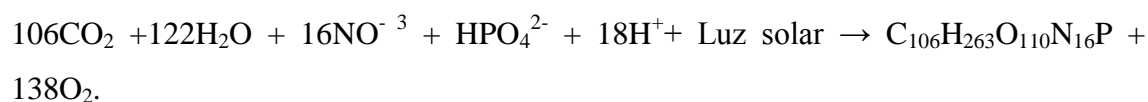
$M_i$  masa molar de i, [kg/mol].

Masa molar de ref, [kg/mol].

Los factores caracterización en esta categoría de impacto se denominan Nutricación Potencial (NP) y se basan en el procedimiento estequiométrico de Heijungs<sup>191</sup>. A continuación se define este procedimiento.

Los EPs están basados en la composición química media de organismos acuáticos<sup>192</sup>, C<sub>106</sub>H<sub>263</sub>O<sub>110</sub>N<sub>16</sub>P, que se asume como la biomasa media representativa. Las únicas emisiones consideradas de ser eutrofizantes por Heijungs fueron emisiones de nitrógeno y fósforo, asumiendo ilimitados aportes de otros nutrientes.

La presencia en las aguas de carbono inorgánico, nitrógeno y fósforo permite el crecimiento de las microalgas (C<sub>106</sub>H<sub>263</sub>O<sub>110</sub>N<sub>16</sub>P). Este fenómeno puede representarse mediante la ecuación de Stumm:



<sup>191</sup> Heijungs, R., Guinée, J. B., Huppes, G., Lankreijer, R. M., Udo de Haes, H. A., Wegener Sleeswijk, A., & De Goede, H. P. (1992). *Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds (Part 1)*. Institute of Environmental Sciences. CML, Leiden openaccess.

<sup>192</sup> Stumm, W., & Morgan, J. J. (1981). *Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. John Wiley.

En este enfoque un mol de biomasa requiere 16 moles de N y 1 mol de P. Cuando la materia orgánica degradable es emitida, el  $O_2$  requerido para su degradación se puede medir como demanda química de oxígeno (DQO). Se asume que la degradación de un mol de biomasa requiere 138 moles de  $O_2$ . Por lo tanto, si la contribución a la eutrofización,  $v_P$ , de un mol de P es 1, la contribución de un mol de N,  $v_N$ , es 1/16 y la DQO,  $v_{O_2}$  es de 1/138. La acidificación se mide en kg de  $PO_4^{3-}$  equivalentes.

En esta categoría, el lapso de tiempo es infinito y la escala geográfica varía entre la escala local y escala continental.

Sustancia		EP
Amoniaco	$NH_3$	0,35
Amonio	$NH_4^+$	0,42
Dióxido de carbono	$NO_2$	0,13
Fósforo	P	30,6
Nitratos	$NO_3^-$	0,095
Nitritos	$NO_2^-$	0,13
Nitrógeno	$N_2$	0,42
Óxido de nitrógeno	$N_2O$	0,27
Pentóxido de fósforo	$P_2O_5$	1,336

Tabla 24. Ejemplos de factores de Eutrofización Potencial para la caracterización de algunas sustancias, [kg  $PO_4^{3-}$ -eq/kg sustancia]

Categoría de impacto	Eutrofización
Inventario de ciclo de vida.	Emisión de nutrientes al aire, suelo, agua (kg)
Modelo de caracterización	Procedimiento estequiométrico, que identifica las equivalencias entre N y P para los sistemas acuáticos y terrestres
Factor de caracterización	Potencial de eutrofización, EP (kg $PO_4^{3-}$ -eq/kg)
Unidad del indicador	kg $PO_4^{3-}$ -eq

Tabla 25. Características de la categoría de impacto Eutrofización.

#### 4.3.3.3.9. Normalización en CML

La normalización en CML se considera opcional en ACV sencillos, pero más que recomendable en aquellos que suscitan gran grado de detalle. Para cada indicador de base, las puntuaciones de normalización se calculan para las situaciones de referencia: el mundo en 1990, 1995 y Europa en los Países Bajos en 1997. La normalización de los datos están disponibles para los Países Bajos (1997-1998), Europa Occidental (1995) y

el mundo ( 1990, 1995 y 2000)<sup>193</sup>, la Unión Europea (los 25 países que la conformaban en 2006, EU25) y la Unión Europea complementado con Islandia, Noruega y Suiza, en el 2000, EU25+3, 2000)

Muchos métodos, como el elegido CML, permiten comparar los resultados del indicador de categoría de impacto con un valor de referencia (o normal). Esto significa que la categoría de impacto se divide por la referencia. Una referencia comúnmente usada es la media anual de un país o continente, dividida por el número de habitantes. Sin embargo, la referencia puede elegirse libremente.

En SimaPro, hay varios conjuntos de normalización disponibles. Después de la normalización, los indicadores de categoría de impacto tienen la misma unidad, lo que facilita su comparación. SimaPro no se divide por el valor de referencia (N), sino que se multiplica por el inverso (1/N).

Toda la normalización de esta tesis doctoral se realiza bajo los factores EU25, en 1/N, y son los siguientes:

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Factor de normalización</b>
Agotamiento de recursos abióticos	1,18 E-8
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	3,18E-14
Cambio Climático (GWP100)	1,99E-13
Agotamiento del ozono estratosférico	1,12E-8
Toxicidad humana	1,29E-13
Ecotoxicidad terrestre	2,06E-11
Formación de oxidación fotoquímica	1,18E-10
Acidificación	3,55E-11
Eutrofización	7,58E-11

Todas las ecuaciones de enumeradas en cada una de las categorías de impacto de este método, han sido obtenidas de Guinée, J. B. (2001)<sup>194</sup>.

<sup>193</sup> Huijbregts, M. A. J., Breedveld, L., Huppes, G., De Koning, A., Van Oers, L., & Suh, S. (2003). *Normalisation figures for environmental life-cycle assessment: The Netherlands (1997/1998), Western Europe (1995) and the world (1990 and 1995)*. Journal of Cleaner Production, 11(7), 737-748

<sup>194</sup> Guinée, J. B. (2001). *LCA—an operational guide to the ISO-standards, part 3 scientific background*. Institute of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden, NL.



#### 4.3.3.4. Huella Hídrica. Boulay et al 2011 (Escasez de agua)

Para completar los resultados, se decide incorporar, además de todos los impactos proporcionados por CML, la categoría Huella Hídrica. Actualmente está tomando mucha relevancia y son crecientes el número de estudios que la incluyen. Es un indicador muy representativo ya que reproduce el gasto de agua teórico implicado en el sistema bajo estudio.

El concepto de huella hídrica no es nuevo<sup>195</sup>. Existe una nueva norma internacional ISO 14046:2014<sup>196</sup> que presenta los principios, requisitos y directrices para la gestión de la huella hídrica. Entenderla, bajo la perspectiva de la Análisis de Ciclo de Vida, es el primer paso.

Este método se basa en la publicación Boulay et al (2011)<sup>197</sup> y adopta su nombre.

Mientras que los posibles impactos ambientales de las emisiones contaminantes en el agua se caracterizan en la EICV, los impactos de la falta de disponibilidad de agua hasta la llegada de estos métodos de Huella Hídrica no estaban cuantificados. El uso del agua en un lugar y condiciones determinadas puede hacer de ella un recurso no disponible para otros usuarios por el agotamiento de la misma o la degradación de su calidad. Una reducción en la disponibilidad de agua para los humanos puede afectar a la salud.

Boulay considera flujos de entrada y salida de agua, así como su calidad y escasez, con el fin de evaluar la pérdida de la funcionalidad de la misma. Los resultados se presentan regionalizados.

Este método tiene como indicador la escasez de agua (WSI, por sus siglas en inglés Water Scarcity Indicator) y se basa en la relación consumo-disponibilidad modelado utilizando una función logística con el fin de encajar el indicador resultante a valores entre 0 y 1  $\text{m}^3/\text{m}^3$  consumidos-disponibles. La curva del modelo se sintoniza usando umbrales de estrés hídrico, que diferencian el estrés hídrico entre moderado y grave

---

<sup>195</sup> Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). *Virtual Water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to crop trade*. Value of Water Research Report Series. 11.

<sup>196</sup> International Organization for Standardization, ISO, 14046 (2014): *Environmental management-Water footprint-Principles, requirements and guidelines*.

<sup>197</sup> Boulay, A. M., Bulle, C., Bayart, J. B., Deschênes, L., & Margni, M. (2011). *Regional characterization of freshwater use in LCA: modeling direct impacts on human health*. Environmental science & technology, 45(20), 8948-8957.

como el 20% y el 40% de las extracciones, respectivamente, y se elaboraron con una correlación empírica. Los indicadores de escasez también están disponibles para aguas superficiales y subterráneas. El consumo de agua y la disponibilidad de datos se toman del modelo WaterGAP<sup>198</sup>. El indicador se aplica al volumen de agua consumida y evalúa el uso consuntivo de agua solamente.

Los factores regionales son promedios ponderados en función de la toma de agua dulce por los datos de los países del Instituto Pacífico<sup>199</sup>

#### **4.3.4. Interpretación.**

En esta fase se cuantifica, comprueba y evalúa la información de los resultados para poder comunicar de manera efectiva conclusiones sólidas. La fase Interpretación de un ACV sirve para dirigir el trabajo hacia la mejora del inventario de ciclo de vida y, a menudo, dar recomendaciones.

En interpretación del ciclo de vida, los resultados de la evaluación se estudian con el fin de responder a las preguntas planteadas en la definición del objetivo. La calidad de los datos procesados debe ser adecuada.

En primer lugar, se identifican los problemas importantes (es decir, los procesos clave, parámetros, los supuestos y los flujos elementales). A continuación, estas cuestiones son evaluados en cuanto a su sensibilidad o la influencia en los resultados globales del ACV.

La norma ISO 14040:2006 establece tres elementos fundamentales en esta etapa.

Identificación de las variables significativas: Consiste en localizar los elementos con mayores impactos, para una posible mejora de los mismos.

Verificación de resultados: Asegurar que toda la información relevante está completa y disponible, realizado a partir de datos fiables, con calidad, sin incertidumbres en los métodos considerados con una comprobación de la consistencia de las hipótesis. Los resultados deberán ser justificables y coherentes.

---

<sup>198</sup> Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., & Siebert, S. (2003). *Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability*. Hydrological Sciences Journal, 48(3), 317-337.

<sup>199</sup> *The World's Water*. Worldwater.org. Accedido el 9 de marzo de 2016, desde <http://www.worldwater.org/data.html>

Conclusiones y recomendaciones: Se deberá analizar las diferentes situaciones estudiadas para poder realizar una mejora del sistema estudiado.

#### **4.4. Herramientas informáticas para el Análisis de Ciclo de Vida.**

Existe un buen número de softwares disponibles para realizar ACVs. Dependerá del grado de detalle del mismo y de la usabilidad, la elección de uno u otro por parte de un usuario.

La metodología para ecodiseño y uso de la energía de la Unión Europea<sup>200</sup> aporta una clasificación de las fuentes de datos para la elaboración de un ACV. Indica que se pueden realizar ACVs simplificado con numerosas herramientas como Eco-It, y Ec-Scan (basadas en metodología Eco-Indicador 99), KEPI (Key Enviromental Performance Indicator), etc.

Para la un ACV completo las herramientas fiables y rigurosas son los software Gabi y SimaPro. También existen softwares libres como OpenLCA.

En esta tesis doctoral los ACVs se ralizarán con el software informático SimaPro, en su versión octava.

##### **4.4.1. SimaPro 8.**

SimaPro es una herramienta profesional para evaluar los impactos ambientales de procesos, productos y servicios. Este software permite modelar y analizar el ciclo de vida de un producto o servicio de una manera sistemática y transparente, siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 14040:2006.

Es una herramienta desarrollada por la empresa holandesa Pré Consultants. Cabe destacar que Pré Consultant es la empresa desarrolladora del método Ecoindicador, que ahora en su versión actualizada es el ReciPe. Así pues, estos dos hitos, la avalan como

---

<sup>200</sup> Kemna, R., Elburg, M. V., Li, W., & Holsteijn, R. V. (2005). *Methodology study eco-design of energy-using products. Final Report*. MEEUP Methodology Report. European Commission DG ENTR. VHK, Delft.

un referente en el ámbito de la sostenibilidad y el Análisis de Ciclo de Vida en particular.

Es un software exitoso con usuarios de más de 60 países. SimaPro permite la realización de ACVs mediante el uso de bases de datos bibliográficas (y previamente incorporadas) o bien creadas por el usuario.

Dispone de gran cantidad de datos de inventario y una interface de usuario dispuesta siguiendo la metodología ISO 14040 y 14044.

Realiza cálculos de evaluación de impacto en cada etapa o subetapa del modelo. Permite la obtención de resultados en formato gráfico, esquema árbol y tabulado.

#### 4.4.1.1. Bases de datos.

Las bases de datos que incorpora SimaPro 8 son numerosas, siendo la más destacada Ecoinvent en su versión 3. Todos los programas que realizan ACV incorporan a bases de datos para usarse en la fase de Inventario de Ciclo de Vida. A continuación se nombran algunas de las que aparecen en SimaPro 8.

Basadas en masa	Basadas en factores económicos
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ecoinvent v3.</li> <li>▪ ELCD v2.0: European Life Cycle Database producida por la UE. Libre acceso.</li> <li>▪ Industry Data 2.0: datos producidos por las propias industrias (por ejemplo, plásticos en Europa)</li> <li>▪ LCA Food DK: datos ambientales sobre alimentación en Dinamarca</li> <li>▪ US LCI: United States Life Cycle Inventory</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ EU &amp; DK Input Output Database</li> <li>▪ USA Input Output Database 98</li> </ul>

Tabla 26. Bases de datos para ACVs.

Ecoinvent es la base de datos referencia en Europa por su transparencia e independencia ya que es una asociación sin ánimo de lucro desde 2013. Dispone de más de 14000 referencias. Es una base de datos creada por el centro suizo de su mismo nombre. SimaPro 8 incorpora la versión Ecoinvent v3, que es la utilizada en esta tesis doctoral.

Ecoinvent es un centro fundado por cinco Institutos suizos en 1997, desde entonces lleva actualizando sus bases de datos para ofrecer mejores aportes a la comunidad científica.

La base de datos completa consta de más de 10.000 conjuntos de datos interrelacionados, cada uno de los cuales describe en niveles de proceso el inventario de ciclo de vida completo. SimaPro contiene cuatro bibliotecas que contienen todos los procesos que se encuentran en la base de datos ecoinvent, pero utilizan diferentes modelos, de sistema o de unidad.

La versión Ecoinvent 3 se lanza en mayo de 2013 y tiene dos versiones de sus procesos. Una en versión atribucional, es decir por asignación y otra consecuencial, es decir por sustitución. En esta tesis se toma como base de datos el modelo atribucional, ya que en él, los datos de inventario, representan los impactos ambientales atribuibles a un sistema a lo largo de su ciclo de vida, es decir, aguas arriba de la cadena de suministro y aguas abajo del uso del sistema de valor al final de su vida. Son datos medibles, históricos y basados en hechos de conocida incertidumbre. De ahí la elección del mismo frente al modelo consecuencial, que es un modelo orientado al efecto, tiene como objetivo identificar las consecuencias que una decisión en el sistema tiene para otros procesos y sistemas de la economía. Se considera esta visión menos científica y por ello se toma la atribucional, por ser más contable y tangible.

# CAPÍTULO V

## **5.MATERIALES A ESTUDIO.**

## 5.1. Introducción.

La tecnología solar de concentración es una tecnología novedosa, se debe tener en cuenta que las instalaciones comerciales de centrales CSP comenzaron alrededor del año 1984<sup>201</sup>. Asimismo, la selección de materiales en una central termosolar de concentración se ha basado en la elección de aquellos que presentaban buenas prestaciones para otras tecnologías. Según Tortorelli los primeros aceros eran aceros al carbono estándar<sup>202</sup>. No solo al principio, sino hasta hace algunos años (2010), se encuentran estudios que confirman la aplicación de aceros al carbono como el A516 en aplicaciones de alta temperatura<sup>203</sup>.

Los fallos y los procesos corrosivos que se produjeron, dieron lugar a la inclusión de aceros inoxidables para las zonas con aplicaciones con temperaturas superiores como pueden ser los tanques del almacenamiento caliente. Los aceros inoxidables solucionaban los problemas de corrosión pero aumentaban los costes.

La tecnología termosolar no puede quedarse atrás con respecto a otras tecnologías renovables, por ello, el aumento de los costes no es una opción. Su kWh debe ser igual de competitivo que el de tecnologías más desarrolladas como puede ser la solar fotovoltaica o la eólica, que le llevan ventaja en cuanto a años de investigación en la materia.

Existen estudios centrados tanto en el estudio de los procesos corrosivos acero-sal, como en encontrar recubrimientos para aceros al carbono y baja aleación que hagan que el binomio resistencia competitividad sea factible<sup>204, 205</sup>.

---

<sup>201</sup> *Concentrating Solar Power Projects - Solar Electric Generating Station I*. Concentrating Solar Power . NREL. (2009). Nrel.gov. Accedido el 17 Mayo 2016, desde [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=28](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=28)

<sup>202</sup> Tortorelli, P. F., Bishop, P. S., & DiStefano, J. R. (1989). *Selection of corrosion-resistant materials for use in molten nitrate salts* (No. ORNL/TM-11162). Oak Ridge National Lab., TN (USA).

<sup>203</sup> Bradshaw, R. W., & Clift, W. M. (2010). *Effect of chloride content of molten nitrate salt on corrosion of A516 carbon steel*. Sandia report.

<sup>204</sup> Fernandez, A. G., Lasanta, M. I., & Perez, F. J. (2012). *Molten salt corrosion of stainless steels and low-Cr steel in CSP plants*. *Oxidation of metals*, 78(5-6), 329-348.

<sup>205</sup> Fernández Díaz-Carralero, Á. G. (2013). *Estudios físico-químicos y de corrosión a elevada temperatura para el diseño de nuevos fluidos almacenadores de energía en centrales solares de concentración*. Universidad Complutense de Madrid.



Si bien en un primer momento no se contempló, actualmente se está avanzando en la selección de materiales teniendo en cuenta los procesos corrosivos y buscando el equilibrio anteriormente citado.

Lo que resulta novedoso es la selección de materiales, no solo teniendo en cuenta todo lo anterior sino cómo impactan los mismos sobre el medio ambiente. A continuación se procede a la descripción de los materiales estudiados para, en un capítulo posterior, poder analizar sus impactos medioambientales.

Los materiales descritos a continuación son los que conforman el sistema acero-fluido de transferencia de calor, y acero-fluido de almacenamiento térmico.

## 5.2. Acero al carbono A516.

El material A516 es un acero al carbono. Se trata de un acero utilizado sobre todo para recipientes a presión resistentes al calor, fabricación de calderas, recipientes a presión y tuberías de transporte de fluidos. Asimismo, ofrecen buenas propiedades en temperaturas moderadas.

	C	Mn	P	S	Co	Mo	Si	Ni	Cu	Cr	N	Nb	Ti	Sn
(%)	0,18	0,95	0,015	0,008	0,01	0,08	0,40	0,30	0,30	0,30	0,02	0,01	0,03	0,02

Tabla 27. Composición química del acero A516.

Propiedades físicas	
Densidad	7.85 g/cm <sup>3</sup>
Módulo elástico	200 GPa
Calor específico	0.470 J/g °C
Conductividad térmica	52.0 W/m K

Tabla 28. Propiedades físicas del acero al carbono A516. Fuente: Handbook, A. S. M. (1990)<sup>206</sup>.

Este acero al carbono históricamente ha sido utilizado en la industria petrolera, en la cual tenía buenos resultados. Por lo que se optó para su uso en la industria solar de concentración.

El Mo es el aleante, aun siendo de los más simples, que es capaz de aumentar la fluencia a temperaturas elevadas y aumenta la resistencia al reblandecimiento durante el tratamiento de templado<sup>207</sup>.

<sup>206</sup> Handbook, A. S. M. (1990). *Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys*. ASM international, 1, 140-194.

Se trata de uno de los aceros utilizados en las termosolares en las que el almacenamiento térmico no supera los 350°C por lo que su uso se limita a las tuberías por las que circulan las sales frías y para el depósito de almacenamiento de las mismas.

La tecnología de cilindros parabólicos podría alcanzar temperaturas de trabajo por encima de esa temperatura para lo cual se requeriría del uso de otro material ya que, de lo contrario, aparecería corrosión por oxidación y se generaría magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Es por ello por lo que se utilizan aceros inoxidable resistentes a la temperatura y a la corrosión provocada por las sales.

En esta tesis, el acero A516 se utilizará en el tanque de almacenamiento frío y se estudiará su comportamiento medioambiental.

### 5.3. Acero T22.

El acero T22, es una aleación que tiene un pequeño contenido en cromo (alrededor de un 2 % en peso). Esta adición incorpora una considerable mejora con respecto a los aceros al carbono. La combinación de cromo y molibdeno le confiere una buena resistencia a la fluencia. Se considera interesante el estudio de este material para evaluar la mejora que introduce la presencia del cromo con respecto al acero A516 en las mismas condiciones.

	<b>C</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>
<b>(%)</b>	0,1	0,025	0,025	0,4	0,9	0,5	2

Tabla 29. Composición química del acero T22.

<b>Propiedades físicas</b>	
Densidad	7,76 g/cm <sup>3</sup>
Módulo elástico	210 GPa
Calor específico	0.622 J/g °C
Conductividad térmica	33.0 W/m K

Tabla 30. Propiedades físicas del acero al carbono A516. Fuente: ThyssenKrupp Materials International.

Puede ser usado en permanente operación hasta temperaturas de hasta 590°C.

Es un acero muy utilizado en la industria petroquímica, en la industria gasista e incluso construcción naval. En centrales térmicas, es usado en tubos colectores y en intercambiadores de calor.

<sup>207</sup> Pacheco, J. E., Showalter, S. K., & Kolb, W. J. (2002). *Development of a molten-salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants*. Journal of solar energy engineering, 124(2), 153-159.

Pese a su bajo contenido en Cr, no presenta una oxidación demasiado acuciada<sup>208</sup>, en estudios realizados a temperatura en torno a los 600°C.

Esta característica convierte al T22 en uno de los aceros al carbono más usados en centrales de generación eléctrica.

En esta tesis, el acero T22 se utilizará en el tanque de almacenamiento frío y se estudiará su comportamiento medioambiental.

#### 5.4. Acero inoxidable austenítico AISI 316.

Su característica inoxidable se obtiene mediante la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo. La aleación 316 es un acero inoxidable austenítico de uso general con una estructura cúbica de caras centradas. Es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío.

El acero 316 contiene del 2% a 3% de molibdeno lo que mejora la resistencia a la corrosión frente a diversos agentes químicos agresivos, ácidos y atmósfera salina. La adición de Mo mejora la resistencia frente a la corrosión por picadura debido a la formación de una capa protectora de gran resistencia. Resiste salmueras de sodio y de calcio; soluciones de hipoclorito, ácido fosfórico; así como sulfitos y ácidos sulfurosos.

Es un acero biocompatible por lo que entre sus aplicaciones se encuentran la maquinaria para procesamiento de alimentos y así como equipos farmacéuticos o implantes quirúrgicos. Por su resistencia, se aplica en molduras en exteriores de ambiente marino, y equipos industriales que se encargan de los procesos químicos corrosivos utilizados para producir tintas, productos químicos fotográficos, papel, o textiles.

El tipo 316L contiene menor cantidad de carbono y es más adecuado para aplicaciones intensivas con soldadura.

	C	Mn	P	S	Co	Mo	Si	Ni	Cu	Cr	N	Ti	Sn
%	0,03	1,2	0,025	0,002	0,12	2,14	0,36	10,55	0,25	16,88	0,04	0,022	0,07

Tabla 31. Composición química del acero 316.

<sup>208</sup> Barón, Y. S., Navas, G., & Ruiz, A. (2010). *Mecanismo de oxidación de un acero 1, 25Cr-0, 5Mo Wt en aire a 600°C*. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 40-45.

En la actualidad, este es el acero más utilizado en las termosolares y su principal aplicación es en los conductos y tanques de almacenamiento de sal caliente.

<b>Propiedades físicas</b>	
Densidad	8.00 g/cm <sup>3</sup>
Módulo elástico	193 GPa
Calor específico	0.500 J/g °C
Conductividad térmica	16.3 W/m K

Tabla 32. Propiedades físicas del acero 316. Fuente: Handbook, A. S. M. (1990)<sup>209</sup>.

En esta tesis, el 316 se utilizará en las aplicaciones que tienen que soportar altas temperaturas como intercambiadores y tanque caliente, debido a las temperaturas que se alcanzan en estos elementos.

## 5.5. Acero P92.

El P92, también conocido como T92, es un acero ferrítico-martensítico micro aleado con vanadio y niobio, con un contenido de boro y nitrógeno controlado según la norma ASTM A 335, A 213 o con la norma EN 10216 bajo la designación X10CrWMoVNb9-2.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	N	Mo	Ni	Nb	Al	Ti	V	B	W	Zr
%	0,12	0,21	0,49	0,014	0,002	8,7	0,053	0,38	0,17	0,06	0,01	0	0,18	0,003	1,65	0

Tabla 33. Composición química del acero P92.

<b>Propiedades físicas</b>	
Densidad	7.70 g/cm <sup>3</sup>
Módulo elástico	200 GPa
Calor específico	0.460 J/g °C
Conductividad térmica	25 W/m K

Tabla 34. Propiedades físicas del acero P92. Fuente: Handbook, A. S. M. (1990)<sup>210</sup>.

En plantas de energía, este acero se utiliza principalmente para aplicaciones de alta temperatura como puede ser en el sobrecalentador y recalentador, e intercambiadores y tuberías de vapor (vapor principal y recalentado caliente).

EL T92 / P92 presenta una excelente comportamiento de resistencia a temperaturas elevadas de hasta 600 ° C - 620 ° C. Su contenido en cromo del 9% ofrece una mejor

<sup>209</sup> Handbook, A. S. M. (1990). *Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys*. ASM international, 1, 140-194.

<sup>210</sup> Handbook, A. S. M. (1990). *Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys*. ASM international, 1, 140-194.

resistencia a la corrosión y la oxidación que el acero T22. Además, consigue reducir el peso de componentes de calderas y tuberías permitiendo además una mayor resistencia a la fatiga térmica. En comparación con los aceros austeníticos, el P92 tiene una mayor transferencia de calor y coeficientes de dilatación térmica menores.

En esta tesis, el P92 se utilizará en las condiciones, intercambiadores y tanque caliente, debido a las temperaturas que se alcanzan en estos elementos.

## 5.6. Aceite térmico Therminol.

Therminol es el nombre comercial del aceite térmico que se va a analizar en la presente tesis doctoral.

En los colectores solares se capta el calor procedente del sol y se conduce hasta el bloque de potencia usando como medio un fluido caloportador. La mayoría de las centrales cilindro parabólicas usan como fluido caloportador aceite térmico, que es un aceite orgánico y sintético.

Este fluido es una mezcla eutéctica de bifenilo y óxido de difenilo, moléculas ambas derivadas del benceno. Es una mezcla eutéctica porque su punto de congelación es inferior al de cada uno de los componentes por separado: es de 12°C.

	<b>Óxido de difenilo</b>	<b>Bifenilo</b>
<b>%</b>	73,5	26,5

Tabla 35. Composición química aceite sintético Therminol.

La vida del fluido térmico caloportador no es eterna. Durante su uso sufre una degradación que depende dos factores: las condiciones de operación y la temperatura de trabajo, este aceite tiene la limitación que no se puede utilizar por encima de 400 °C.

El aceite térmico sufre una degradación por su uso que provoca impactos económicos y en la seguridad de la planta, ya que algunos productos de la degradación son peligrosos.

Se degrada por tres vías: la contaminación con residuos de tuberías y con agua del ciclo de potencia; la oxidación, por reacción del aceite con el oxígeno ambiental; y el cracking, que es un fenómeno que se produce en la película de aceite en contacto con el

metal del tubo absorbedor del colector solar. El aumento de temperatura de esa película de aceite, provoca la ruptura de las moléculas en otras más pequeñas.

Estas degradaciones dejan como residuos precipitados sólidos como ácidos carboxílicos y carbonillas, que arden con facilidad y pueden producir daños en equipos tales como bombas y válvulas. Tienen características ácidas por lo que pueden ocasionar problemas de corrosión.

La ruptura de las moléculas de bifenilo y óxido de difenilo produce hidrocarburos de cadena corta que tienen puntos de ebullición bajos y, por tanto, modifican el punto de ebullición del aceite térmico y la viscosidad del mismo. A su vez, la unión de diversos hidrocarburos de cadena corta, puede ocasionar la formación de hidrocarburos de cadena larga, los cuales también modificarán la viscosidad y propiedades térmicas del fluido.

Para eliminarlos o evitarlos las instalaciones están dotadas de filtros y otros sistemas.

En una planta con 2000 Tn de fluido térmico es necesario reponer aproximadamente unos 500 kg diarios. Cada diez años será necesario reemplazar todo el fluido térmico<sup>211</sup>.

Precisamente la restricción de las temperaturas operativas a 400°C por del uso de aceite térmico como fluido caloportador, es una de los puntos flacos de la tecnología cilindro-parabólica ya que no disponer de temperaturas más elevadas, hace que se obtengan sólo moderadas calidades de vapor<sup>212</sup>.

Se está investigando la posibilidad de sustituir el aceite por otro tipo de fluidos como sales fundidas<sup>213</sup>.

Las sales fundidas tienen, actualmente, su principal aplicación en el almacenamiento térmico. La ventaja de las sales fundidas frente al aceite térmico es que éstas permitirían trabajar en unos rangos de temperatura superiores, lo que mejoraría considerablemente el rendimiento de las instalaciones.

---

<sup>211</sup> García Garrido, S. (2010). *Degradación del Fluido Térmico*. RENOVETEC, formación técnica especializada. Accedido el 18 de abril 2016, desde <http://www.renovetec.com/articulos/degradadofluidotermico.html>

<sup>212</sup> Fernández Díaz-Carralero, Á. G. (2013). *Estudios físico-químicos y de corrosión a elevada temperatura para el diseño de nuevos fluidos almacenadores de energía en centrales solares de concentración*. Universidad Complutense de Madrid.

<sup>213</sup> Bauer, T., Pfleger, N., Laing, D., Steinmann, W., Eck, M., & Kaesche, S. (2013). *High-temperature molten salts for solar power application*. Molten Salts Chemistry, 415-438.

En tecnología cilindro-parabólica existe una planta desde 2010 de 5MW en Siracusa, Italia, que ya utiliza sales fundidas como HTF, es la planta Arquimede<sup>214</sup>.

### 5.7. Sales fundidas: Sal solar binaria y sal solar Hitec.

El uso de las sales fundidas en tecnologías de concentración solar aparece como consecuencia de la necesidad reducir la degradación de las instalaciones y de facilitar el almacenamiento de energía en forma de calor para su posterior utilización. Inicialmente, las plantas solares utilizaban agua lo que generaba grandes problemas de corrosión. Las sales fundidas, a diferencia del agua pueden operar a presión ambiente a altas temperaturas. Además generan menos problemas de corrosión haciendo la instalación más duradera. La densidad de energía almacenada (calor específico por densidad) que pueden acumular las sales fundidas es de unos 2650 KJ/m<sup>3</sup>.K, un valor alto que facilita el almacenamiento del calor para uso posterior<sup>215</sup>.

Actualmente está extendida la utilización de la mezcla de las sales NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>, aunque se siguen llevando a cabo investigaciones sobre nuevas sales.

Los primeros desarrollos de sales fundidas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Oak Ridge (ORNL) con fines de propulsión de aeronaves, entre de los años 1950 y 1960 la finalidad era diseñar de un reactor con sales fundidas<sup>216</sup>.

Existieron aplicaciones posteriores en el ámbito nuclear, para el enfriamiento de los núcleos. Desde las primeras aplicaciones, el problema de corrosión en materiales estructurales en contacto con las sales ha sido una cuestión importante a resolver<sup>217</sup>.

El uso de sales fundidas bajo costo como fluido de transferencia de calor y almacenamiento de energía térmica vendría más tarde. Silverman y Engel hicieron una revisión de las capacidades de la sal solar y Hitec® ya en 1977<sup>218</sup>.

<sup>214</sup> *Concentrating Solar Power Projects – Archimede. Concentrating Solar Power. NREL.* (2012). *Nrel.gov.* Accedido el 18 de mayo de 2016, desde [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=19](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=19)

<sup>215</sup> Iglesias Fernández, D. (2012). *Estudio numérico del flujo de sales fundidas en un receptor central de torre mediante Fluent.* Universidad Carlos III de Madrid.

<sup>216</sup> Haubenreich, P. N., & Engel, J. R. (1970). *Experience with the molten-salt reactor experiment.* Nuclear Technology, 8(2), 118-136.

<sup>217</sup> Briant, R. C., & Weinberg, A. M. (1957). *Molten fluorides as power reactor fuels.* Nuclear science and engineering, 2(6), 797-803.

En 1995, surge la primera central termosolar comercial con almacenamiento térmico mediante sales fundidas<sup>219</sup>. Utilizaba para ello la sal solar binaria con composición 60%NaNO<sub>3</sub>+ 40%KNO<sub>3</sub>. Era la planta Solar One, en el desierto de Mojave, EEUU.

Actualmente, se están haciendo esfuerzos sinérgicos en el desarrollo de fluidos de transferencia de calor, especialmente teniendo en cuenta las posibilidades de la energía solar con almacenamiento térmico<sup>220</sup>. Hace décadas se realizaron estudios de aplicación de sales fundidas en otras áreas porque la investigación en tecnología nuclear y aeroespacial estaba en auge<sup>221,222</sup>. La necesidad de descarbonizar<sup>223</sup> la matriz energética del siglo actual ha atraído y renovado la atención de los estudios hacia el campo termosolar.

El uso de sal fundida como HTF en una planta cilindro-parabólica tiene varias ventajas. Con sal, es posible elevar la temperatura de salida del campo solar a 450-500 ° C, lo que aumenta la eficiencia del ciclo Rankine al 40% en comparación con los 393 ° C que puede dar el aceite de térmico actual y un ciclo eficiencia de 37,6%. El aumento de temperatura del HTF en el campo de colectores puede reducir hasta en un factor de 2,5, el tamaño físico del sistema de almacenamiento térmico para una capacidad dada. Por otra parte, la sal fundida es más barata y con menos impacto ambiental que el actual HTF<sup>224</sup>.

El compromiso entre la eficiencia térmica y la economía<sup>225</sup> hace que el almacenamiento térmico en CSP mediante sales fundidas sea la opción más competitiva. Algunas mezclas que contienen Li-y otros aditivos también han sido investigadas y patentado

<sup>218</sup> Silverman, M. D., & Engel, J. R. (1977). *Survey of technology for storage of thermal energy in heat transfer salt* (No. ORNL/TM-5682). Oak Ridge National Lab., Tenn.(USA).

<sup>219</sup> Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lazaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 31-55.

<sup>220</sup> Slocum, A. H., Codd, D. S., Buongiorno, J., Forsberg, C., McKrell, T., Nave, J. C., & Rojas, F. (2011). *Concentrated solar power on demand*. Solar Energy, 85(7), 1519-1529.

<sup>221</sup> Lacy, D. E., Coles-Hamilton, C., & Juhasz, A. (1987). *Selection of high temperature thermal energy storage materials for advanced solar dynamic space power systems*. NASA.

<sup>222</sup> Misra, A. K., & Whittenberger, J. D. (1987). *Fluoride salts and container materials for thermal energy storage applications in the temperature range 973 to 1400 K*. NASA.

<sup>223</sup> Denholm, P., King, J. C., Kutcher, C. F., & Wilson, P. P. (2012). *Decarbonizing the electric sector: Combining renewable and nuclear energy using thermal storage*. Energy Policy, 44, 301-311.

<sup>224</sup> Kearney, D., Herrmann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., & Price, H. (2003). *Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field*. Journal of solar energy engineering, 125(2), 170-176.

<sup>225</sup> Siegel, N. P. (2012). *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ*, 1, 119.



para el futuro el desarrollo<sup>226,227</sup>. Pero, los nitratos y nitritos no sólo son más baratos, sino también mucho menos corrosivo que los fluoruros o cloruros. Si bien es cierto que las capacidades térmicas podrían mejorarse en una solución intermedia entre mejora de las propiedades térmicas y costo. Igualmente, las particularidades de la sal solar binaria y la mezcla Hitec, hacen de ellas las sales más competitivas<sup>228</sup>.

El creciente interés en la industria energética por las aplicaciones de las sales fundidas se justifica por de sus propiedades.

Las sales de nitrato tienen bajas tasas de corrosión con frente a aceros comunes, son térmicamente estables en el los rangos de temperatura requeridos por los ciclos Rankine, tienen presiones de vapor muy bajas, están ampliamente disponibles, y son relativamente baratas.

El principal reto de la sal fundida es su alto punto de fusión, lo que lleva a complicaciones relacionadas con la protección en el campo solar. El aceite sintético utilizado actualmente se congela a aproximadamente a 15 ° C, mientras que los sistemas ternario y binario de sales, se funden a aproximadamente 120 ° C y 220 ° C, respectivamente. Esto exige métodos innovadores de protección y un aumento de la operación y mantenimiento (O & M). También hay otras consideraciones importantes relacionadas con el uso de sales fundidas. Por ejemplo, los materiales de contención de estos fluidos, ya que el límite de temperatura del lado de alta deseado puede ser restringido por la durabilidad y el rendimiento de la superficie selectiva.

---

<sup>226</sup> Gomez, J. C. (2011). *Change Materials (PCM) Candidates for Thermal Energy Storage (TES) Applications*. Contract, 303, 275-3000.

<sup>227</sup> Li, Y., Zhang, Y., Li, M., & Zhang, D. (2013). *Testing method of phase change temperature and heat of inorganic high temperature phase change materials*. Experimental thermal and fluid science, 44, 697-707.

<sup>228</sup> Serrano-López, R., Fradera, J., & Cuesta-López, S. (2013). *Molten salts database for energy applications*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 73, 87-102.

### 5.7.1. Sal Solar binaria.

Composición %		Punto de fusión °C	Temperatura máxima de operación °C	Propiedades a 300°C		
NaNO <sub>3</sub>	KNO <sub>3</sub>			Densidad, kg/m <sup>3</sup>	Viscosidad, cp	Calor específico, J/kKg
60	40	220	600	1899	3,26	1495

Tabla 36. Propiedades de la Sal Solar Binaria. Fuente: Karney et al.<sup>229</sup>.

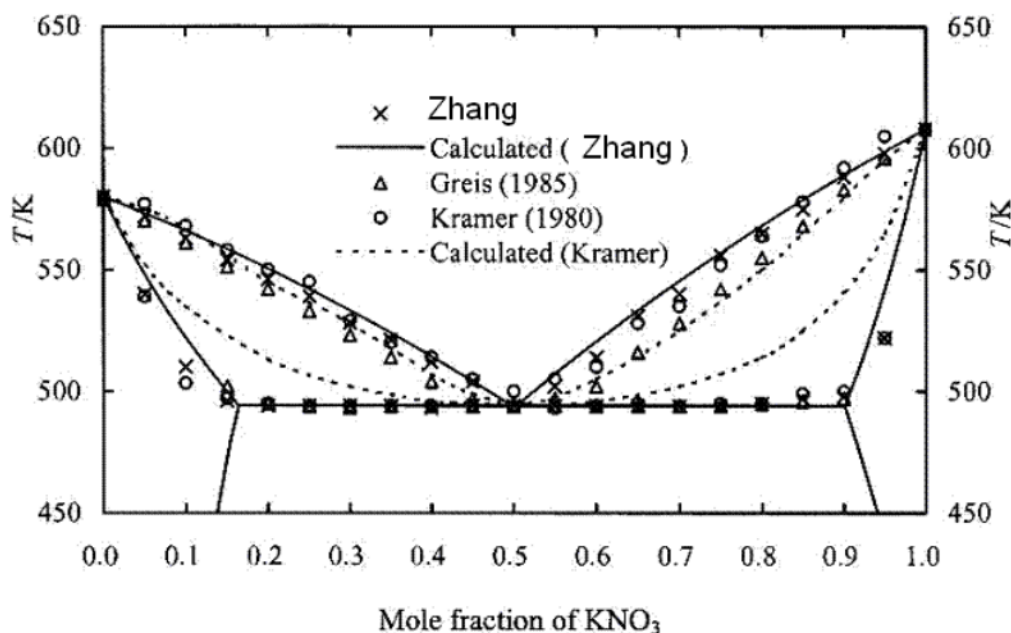


Figura 45. Diagrama de fases de la mezcla binaria KNO<sub>3</sub> y NaNO<sub>3</sub>. Fuente: Bauer, T et al.<sup>230</sup>.

El sistema binario KNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>3</sub> es bien conocido y dispone de importantes aplicaciones comerciales tales como baños para tratamientos térmicos, fluidos de transferencia de calor y como medio de almacenamiento de calor sensible<sup>231</sup>. Los resultados del sistema se han publicado en más de 40 publicaciones desde 1857. Destacan los siguientes: Rogers y Janz<sup>232</sup>, Berg y Kerridge<sup>233</sup> y Zhang et al.<sup>234</sup>. Los

<sup>229</sup> Kearney, D., Herrmann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., & Price, H. (2003). *Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field*. Journal of solar energy engineering, 125(2), 170-176.

<sup>230</sup> Bauer, T., Laing, D., & Tamme, R. (2011). *Recent progress in alkali nitrate/nitrite developments for solar thermal power applications*. Molten Salts Chemistry and Technology, 543-553.

<sup>231</sup> Laue, W. et al. (1998) *Nitrates and Nitrites*. Ullmann's Encycl. of Industrial Chemistry, 6 Edition.

<sup>232</sup> Rogers, D. J., & Janz, G. J. (1982). *Melting-crystallization and premelting properties of sodium nitrate-potassium nitrate. Enthalpies and heat capacities*. Journal of Chemical and Engineering Data, 27(4), 424-428.

<sup>233</sup> Berg, R. W., & Kerridge, D. H. (2004). *The NaNO<sub>3</sub>/KNO<sub>3</sub> system: the position of the solidus and sub-solidus*. Dalton Transactions, (15), 2224-2229.

detalles del diagrama de fases aún no están completamente de acuerdo. La Figura 45 resume algunos diagramas de fase del sistema de  $\text{KNO}_3$ - $\text{NaNO}_3$  publicados. En ella se aprecie la discrepancias de la línea solidus y liquidus.

De todas formas, la literatura reciente, acuerda que la composición con temperatura de fusión mínimo es  $\text{KNO}_3$  (50 mol%) -  $\text{NaNO}_3$  (50 mol%), o, alternativamente, en términos porcentaje de masa de alrededor de  $\text{KNO}_3$  (54% en peso) -  $\text{NaNO}_3$  (46% en peso). El valor de la media temperatura de fusión en la literatura es de  $222^\circ\text{C}$ <sup>235</sup>.

La sal solar se considera generalmente como una mezcla de 60% en peso (o el 64% molar) y  $\text{NaNO}_3$  40% en peso (o el 34% molar) de  $\text{KNO}_3$ . La Figura 45 muestra que la sal solar no es el punto mínimo de fusión de la mezcla. En lugar de ello, tiene una región de dos fases entre las líneas de solidus y liquidus.

Esta sal presenta importantes ventajas como fluido de almacenamiento; como son su alta densidad, alta capacidad calorífica, elevada temperatura de descomposición (o de operación máxima) y coste competitivo. Además sus propiedades físicoquímicas la hacen adecuada para su uso como fluido de almacenamiento de calor en tanques de grandes dimensiones.

Gracias a estas propiedades, existe la posibilidad de trabajar a altas temperaturas. Esto permite obtener un vapor de alta temperatura y producir una conversión en energía eficiente.

La sal solar binaria fue seleccionada como la sal más práctica para aplicaciones de torre central porque el límite de temperatura de operación máximo ( $600^\circ\text{C}$ ) permite la tecnología suficiente para ser utilizado con la mayoría de las turbinas de alta eficiencia de ciclo Rankine. Además, es una de las sales de nitrato con menor costo. Sin embargo, una desventaja importante de la sal solar binaria es su punto de fusión relativamente alto

---

<sup>234</sup> Zhang, X., Tian, J., Xu, K., & Gao, Y. (2003). *Thermodynamic evaluation of phase equilibria in  $\text{NaNO}_3$ - $\text{KNO}_3$  system*. Journal of phase equilibria, 24(5), 441-446.

<sup>235</sup> Bauer, T., Laing, D., & Tammé, R. (2011). *Overview of PCMs for concentrated solar power in the temperature range 200 to 350 C*. Advances in Science and Technology Vol. 74, pp. 272-277.

de 220 ° C. La sal Hitec ofrece un punto de congelación inferior de aproximadamente 140 ° C pero a un costo mayor.<sup>236</sup>

### 5.7.2. Sal Hitec.

Composición %			Punto de fusión °C	Temperatura máxima de operación °C	Propiedades a 300°C		
NaNO <sub>3</sub>	KNO <sub>3</sub>	NaNO <sub>2</sub>			Densidad, kg/m <sup>3</sup>	Viscosidad, cp	Calor específico, J/kKg
7	53	40	142	593	1640	3,16	1560

Tabla 37. Propiedades de la Sal Solar Hitec. Fuente: Karney et al<sup>237</sup>.

Este sistema de ternario ha sido examinado por una serie de autores. Su diagrama de fases ha sido publicado por Kirst et al.<sup>238</sup>, Alexander y Hindin<sup>239</sup>, Berul y Bergman<sup>240</sup>, Sakai<sup>241</sup> y Kagan y Kamyschan<sup>242</sup>, entre otros. Las publicaciones están de acuerdo en que la composición con un punto de fusión mínimo está cerca del de la sección diagonal KNO<sub>3</sub>- NaNO<sub>2</sub> y tiene una composición de KNO<sub>3</sub> (53% en peso) - NaNO<sub>2</sub> (40 % En peso) - NaNO<sub>3</sub> (7% en peso), o KNO<sub>3</sub> (44% mol) - NaNO<sub>2</sub> (49% mol) - NaNO<sub>3</sub> (7% mol). Esta mezcla es conocida como Hitec y tiene aplicaciones de almacenamiento de energía en 1977<sup>243</sup>. Se ha utilizado desde 1937 como medio de transferencia de calor<sup>244</sup>. La temperatura de fusión de esta mezcla es de 142 ° C.

La mezcla ternaria 40%NaNO<sub>2</sub> + 7%NaNO<sub>3</sub> + 53%KNO<sub>3</sub>, proviene de la investigación llevada a cabo por Kalichevsky<sup>245</sup>. Aunque es G. Picard<sup>246</sup> quien la desarrolla por

<sup>236</sup> Kearney, D., Herrmann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., & Price, H. (2003). *Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field*. Journal of solar energy engineering, 125(2), 170-176.

<sup>237</sup> Kearney, D., Herrmann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., & Price, H. (2003). *Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field*. Journal of solar energy engineering, 125(2), 170-176.

<sup>238</sup> Kirst, W. E., Nagle, W. M., & Castner, J. B. (1940). *A new heat transfer medium for high temperatures*. Transactions of the American Institute of Chemical Engineers, 36, 371-394.

<sup>239</sup> Alexander Jr, J., & Hindin, S. G. (1947). *Phase relations in heat transfer salt systems*. Industrial & Engineering Chemistry, 39(8), 1044-1049.

<sup>240</sup> Berul, S. I., & Bergman, A. G. (1954). *Triple Mutual System of Sodium and Potassium Nitrates and Nitrites (in Russian)*, Izv. Sek. Fiz-Khim. Anal. Inst. Obshch. Neorg. Khim. Akad. Nauk SSSR, 218-235.

<sup>241</sup> Sakai, K. (1954). *A Microphotographic Research on Salt System: NaNO<sub>2</sub>-KNO<sub>3</sub>*. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 27(7), 463-465.

<sup>242</sup> Voskresenskaya, N. K. (1961). *Handbook of solid-liquid equilibria in systems of anhydrous inorganic salts, Vol 1 and 2*. Israel Program for Scientific Translations.

<sup>243</sup> Silverman, M. D., & Engel, J. R. (1977). *Survey of technology for storage of thermal energy in heat transfer salt* (No. ORNL/TM-5682). Oak Ridge National Lab., Tenn.(USA).

<sup>244</sup> Janz, G. J., & Truong, G. N. (1983). *Melting and premelting properties of the potassium nitrate-sodium nitrite-sodium nitrate eutectic system*. Journal of chemical and engineering data, 28(2), 201-202.

<sup>245</sup> U.S. Patent (1945). *Treatment of heat transfer salts*. No 2,375,759, 15 Mayo 1945.

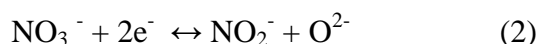
completo para su aplicación en almacenamiento de energía, obteniéndose un punto de fusión de 140°C y un valor de  $C_p = 1,56 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{K}$ .

Las propiedades de densidad, viscosidad y calor específico son similares en la sal binaria y en la Hitec, como se puede observar en la Tabla 36 y Tabla 37.

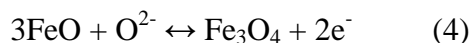
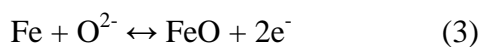
La desventaja de la mezcla ternaria, o Hitec, reside en la necesidad de protegerla por encima de 350°C, con gas inerte, para prevenir la oxidación de los nitritos mediante el oxígeno del aire.

### 5.7.3. Procesos de degradación de sales de nitratos alcalinos fundidos.

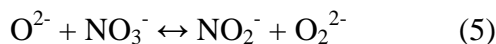
Los procesos de degradación de estas sales están basados en las siguientes reacciones de reducción:



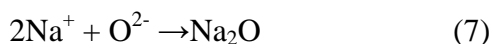
Lo cual deriva en la oxidación de átomos de hierro que difunden desde el material.



Existen estudios<sup>247</sup> que indican la existencia de  $\text{O}^{2-}$  (Óxido),  $\text{O}_2^{2-}$  (Peróxido) y  $\text{O}_2^-$  (Superóxido), que surgen de iones óxido inestables en el nitrato a fundir, confluyendo en la formación de diferentes iones oxidados durante el proceso de degradación, tal y como se describe por las siguientes ecuaciones:

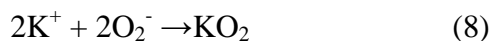


Estos óxidos en estas sales dan como resultado la formación de  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{KO}_2$

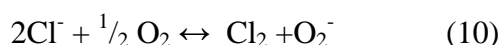


<sup>246</sup> Picard, G., Flament, T., Tremillon, B., Saint-Paul, P., & Spiteri, P. (1985). *U.S. Patent No. 4,559,993*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

<sup>247</sup> Singh, I. B., & Sen, U. (1993). *The effect of NaCl addition on the corrosion of mild steel in NaNO<sub>3</sub> melt*. Corrosion science, 34(10), 1733-1742.



Debido a la necesidad de grandes cantidades de sales de nitratos para su uso industrial como es el caso de las CSP con almacenamiento térmico, dichas sales presentan impurezas<sup>248</sup>. Así pues, puede existir presencia de agua el agua que puede disociarse en  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$ , también otras sustancias como el  $\text{Cl}_2$  provenientes de percloratos presentes en fórmulas comerciales:



Cuando la temperatura aumenta, el ion perclorato comienza a disociarse en oxígeno y cloruro, lo que aumenta de forma exponencial la corrosión de los materiales en contacto con este entorno.

La presencia de ambos, oxígeno y cloro, aumenta la capacidad de corrosión de estas sales<sup>249</sup>.

Estudios<sup>250,251</sup> acerca de la corrosión en el acero llegan a la conclusión de que las impurezas contenidas normalmente en calidades comerciales de nitratos alcalinos tienen efectos en la corrosión de los aceros inoxidables y al carbono.

El ciclo térmico agrava la oxidación a alta temperatura, pero el grado en que un material particular puede verse afectado en cualquier ambiente dado es difícil de predecir, se debe estudiar en laboratorio. Según Bradshaw, R et al<sup>252</sup>, si aumenta la temperatura, las velocidades de corrosión de aceros inoxidable, en comparación con la inmersión isotérmica en sal fundida, se ven incrementadas dependiendo del contenido de cloruro de la sal fundida.

<sup>248</sup> Yan, B., & Lei, F. (2010). *Molten salt synthesis, characterization and luminescence of ZnWO<sub>4</sub>: Eu<sup>3+</sup> nanophosphors*. Journal of Alloys and Compounds, 507(2), 460-464.

<sup>249</sup> Fernández, A. G., Cortes, M., Fuentealba, E., & Pérez, F. J. (2015). *Corrosion properties of a ternary nitrate/nitrite molten salt in concentrated solar technology*. Renewable Energy, 80, 177-183.

<sup>250</sup> Goods, S. H., & Bradshaw, R. W. (2004). *Corrosion of stainless steels and carbon steel by molten mixtures of commercial nitrate salts*. Journal of materials engineering and performance, 13(1), 78-87.

<sup>251</sup> Prairie, M. R., Dunkin, S. R., Chavez, J. M., Bradshaw, R. W., & Goods, S. H. (1994). *Isothermal corrosion testing of steels in molten nitrate salts*. SAND Series Albuquerque, N.M., SAND 93-2334 C.

<sup>252</sup> Bradshaw, R. W., & Goods, S. H. (2001). *Corrosion resistance of stainless steels during thermal cycling in alkali nitrate molten salts (No. SAND-2001-8518)*. Sandia Nat. Lab..

## 5.8. Avances tecnológicos en el desarrollo de sales fundidas y otros fluidos de transferencia de calor.

La búsqueda para lograr temperaturas de funcionamiento más altas con el fin de mejorar la eficacia del ciclo energético ha provocado que el sector de la CSP mire más allá de los aceites minerales en busca de fluidos de transferencia térmica alternativos.

Para lograr sistemas más rentables, hay muchos prometedores avances técnicos, como:

- Nuevas sales (nitrato o nitrito) fundidas que pueden operar en un amplio rango de temperaturas más amplio ( $T < 100^{\circ}\text{C}$  y  $T > 100^{\circ}\text{C}$ ).
- El desarrollo de medios de calor sólidos baratos y con buenas propiedades físicas.
- El desarrollo de nuevos materiales de cambio de fase para sistemas de almacenamiento de energía latente altamente eficiente.
- La identificación de procesos termoquímicos adecuados para los rangos de temperatura de las plantas CSP.

Debido al enfoque de esta tesis, se centrará en los avances en el almacenamiento térmico por medio de sales fundidas, desarrollándolos a continuación.

En los últimos años, los líquidos iónicos (nombre común usado para una sal con temperaturas de fusión por debajo de los  $100^{\circ}\text{C}$ <sup>253</sup>), en concreto las sales fundidas, han surgido como una solución prometedora.

Las características deseables de los medios de almacenamiento y HTF son<sup>254</sup>:

- Baja temperatura de fusión y/o alta temperatura de operación máxima.
- Alta conductividad térmica y densidad adecuada.
- Una buena estabilidad térmica.
- Bajas presiones de vapor.
- Resistencia a la corrosión frente al material de contención.
- Bajo costo.

---

<sup>253</sup> Wilkes, J. S. (2002). *A short history of ionic liquids—from molten salts to neoteric solvents*. Green Chemistry, 4(2), 73-80.

<sup>254</sup> Vignarooban, K., Xu, X., Arvay, A., Hsu, K., & Kannan, A. M. (2015). *Heat transfer fluids for concentrating solar power systems—A review*. Applied Energy, 146, 383-396.

En los últimos años, se está llevando a cabo una amplia investigación en el campo del desarrollo de nuevas sales fundidas así como el estudio de los materiales que son compatibles para contenerlas.

Recientes estudios están analizando no solo sales binarias y ternarias sino cuaternarias y con inclusión de nuevos compuestos en ellas.

Fernandez et al.<sup>255</sup> probaron añadir  $\text{LiNO}_3$  a la mezcla  $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$  con el objetivo de disminuir la temperatura de fusión, así como para mejorar la estabilidad térmica.

Estudios dedujeron que la sal 20%  $\text{LiNO}_3$ –10%  $\text{NaNO}_3$  –60%  $\text{KNO}_3$ –10%  $\text{Ca(NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  es capaz de ampliar el rango de temperatura de funcionamiento desde 130 hasta 550 ° C. Y en lo que a efectos corrosivos se refiere, los resultados analizados sobre los aceros inoxidable T11 y T22, así como sobre el acero al carbono A516, determinaron que el porcentaje en Cr que compone los aceros T11 y T22 reduce el comportamiento frente a corrosión y, además, ayuda a formar un recubrimiento protector en el T22, en comparación con la sal solar binaria convencional<sup>256,257</sup>.

Wang et al.<sup>258</sup> añadieron un compuesto fundido ( $2\text{KNO}_3 \cdot \text{Mg (NO}_3)_2$ ) en el sistema ternario  $\text{LiNO}_3\text{-NaNO}_3\text{-KNO}_3$  para hacer una sal eutéctica. Esta nueva sal tiene una temperatura de fusión de 100,8 ° C, que es unos 17 ° C más baja que la del sistema ternario.

Peng et al.<sup>259</sup> midieron las propiedades termofísicas de sistemas de  $\text{NaNO}_3\text{-NaCl-NaNO}_2$  con diferentes composiciones demostrando que la nueva sal tenía mejor estabilidad térmica y un punto de fusión más bajo y la temperatura óptima de trabajo se incrementó de 500 ° C a 550 ° C.

<sup>255</sup> Fernandez, A. G., Ushak, S., Galleguillos, H., & Pérez, F. J. (2014). *Development of new molten salts with  $\text{LiNO}_3$  and  $\text{Ca (NO}_3)_2$  for energy storage in CSP plants*. Applied Energy, 119, 131-140.

<sup>256</sup> Fernández, A. G., Galleguillos, H., & Pérez, F. J. (2014). *Corrosion ability of a novel heat transfer fluid for energy storage in CSP plants*. Oxidation of Metals, 82(5-6), 331-345.

<sup>257</sup> Fernández, A. G., Ushak, S., Galleguillos, H., & Pérez, F. J. (2015). *Thermal characterisation of an innovative quaternary molten nitrate mixture for energy storage in CSP plants*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 132, 172-177.

<sup>258</sup> Wang, T., Mantha, D., & Reddy, R. G. (2013). *Thermodynamic properties of  $\text{LiNO}_3\text{-NaNO}_3\text{-KNO}_3\text{-}2\text{KNO}_3 \cdot \text{Mg (NO}_3)_2$  system*. Thermochimica Acta, 551, 92-98.

<sup>259</sup> Peng, Q., Yang, X., Ding, J., Wei, X., & Yang, J. (2014). *Thermodynamic performance of the  $\text{NaNO}_3\text{-NaCl-NaNO}_2$  ternary system*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 115(2), 1753-1758.



Actualmente el desarrollo de la técnica está enfocado al desarrollo de líquidos iónicos como reemplazo de los aceites sintéticos convencionales. Existen estudios<sup>260,261</sup> que indican que son prometedores como fluido de trabajo para las plantas termosolares cilindro-parabólicas.

Los líquidos iónicos poseen alta capacidad de calor, alta densidad, alta estabilidad térmica y química, baja presión de vapor y no nocividad y son potenciales candidatos para los sistemas cilindro-parabólicos, también, por su gran disponibilidad, bajo costo, la compatibilidad del material y la seguridad y la salud ambiental<sup>262</sup>.

Por último, indicar que se han realizado investigaciones<sup>263</sup> no tanto para desarrollar nuevos fluidos sino como para optimizar los existentes mediante la inclusión en los mismos de nanopartículas para mejorar el calor específico, la conductividad térmica y la densidad. El efecto de mejora es dependiente del material, forma y tamaño de la partícula, así como el tipo del fluido de base.

## **5.9. Materiales de contención frente a fluidos de almacenamiento térmico.**

El ámbito de la tecnología termosolar presenta un desafío de materiales a la hora de identificar aquellos que son capaces de contener correctamente los fluidos de almacenamiento térmico. Estos materiales deben ser compatibles con propiedades mecánicas adecuadas, y buena resistencia a la corrosión en el rango de temperaturas de trabajo de estos sistemas.

<sup>260</sup> Paul, T. C., Morshed, A. K. M. M., Fox, E. B., Visser, A. E., Bridges, N. J., & Khan, J. A. (2014). *Thermal performance of ionic liquids for solar thermal applications*. Experimental Thermal and Fluid Science, 59, 88-95.

<sup>261</sup> Blake, D. M., Moens, L., Hale, M. J., Price, H., Kearney, D., & Herrmann, U. (2002, September). *New heat transfer and storage fluids for parabolic trough solar thermal electric plants*. In Conference new heat transfer and storage fluids for parabolic trough solar thermal electric plants.

<sup>262</sup> Moens, L., Blake, D. M., Rudnicki, D. L., & Hale, M. J. (2003). *Advanced thermal storage fluids for solar parabolic trough systems*. Journal of solar energy engineering, 125(1), 112-116.

<sup>263</sup> Dudda, B., & Shin, D. (2013). *Effect of nanoparticle dispersion on specific heat capacity of a binary nitrate salt eutectic for concentrated solar power applications*. International Journal of Thermal Sciences, 69, 37-42.

A continuación se presenta una revisión bibliográfica de aquellos estudios que han analizado el comportamiento de materiales de contención en contacto con fluidos de almacenamiento térmico.

La mayoría de las plantas en funcionamiento utiliza la sal solar binaria para el almacenamiento que, según un estudio del proyecto Solar Two<sup>264</sup>, es compatible a altas temperaturas con aceros inoxidables comunes, tales como el 304, 316 y 347. Ya que se encontraron pérdidas del material inferiores a 4  $\mu\text{m}$ , tras 2000h.

En otro reciente estudio<sup>265</sup> se analizó el efecto que tiene sobre la corrosión incorporar un recubrimiento de alúmina sobre los aceros T22 y 304, en contacto con sal solar binaria, a 390°C. Determinaron que el recubrimiento era altamente protector frente a los nitratos, prácticamente no detectaron degradación alguna.

En la línea del análisis de recubrimientos frente a protección contra corrosión, Yan et al.<sup>266</sup> investigaron el comportamiento de una alúmina. Llegaron a la conclusión de que la capa de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  /  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  era una barrera eficaz debido a su alta densidad.

El desarrollo de la técnica está en encontrar materiales y fluidos resistentes a altas temperaturas, así pues, los laboratorios Sandia<sup>267</sup> testaron aleaciones base níquel (Inconel 625 y Hastelloy 230) a temperaturas elevadas. Dentro de un recipiente de acero inoxidable 316 con sal solar a 600 °C y 680°C se introdujeron fichas de Inconel 625 y Hastelloy 230 en periodos de hasta 4000h, si bien las tasas de corrosión estaban por debajo de 25  $\mu\text{m/año}$  a 600 °C para ambas aleaciones, a 680 °C la velocidad de corrosión aumentaba hasta 594  $\mu\text{m/año}$  y 688  $\mu\text{m/año}$  para el Inconel 625 y el Hastelloy 230 respectivamente. Por otro lado, la sal solar a esas temperaturas se degradaba a  $\text{NO}_2$  fuertemente perdiendo sus propiedades termofísicas. Además, se existían cantidades significativas de cromo proveniente del acero 316. Así pues, lo que se deduce de lo

<sup>264</sup> Dawson D, Bradshaw B, Goods S. (2002). *Final test and evaluation results from the Solar Two project (No. SAND2002-0120)*. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (US); Sandia National Labs., Livermore, CA (US).

<sup>265</sup> Fernández, A. G., Rey, A., Lasanta, I., Mato, S., Brady, M. P., & Pérez, F. J. (2014). *Corrosion of alumina-forming austenitic steel in molten nitrate salts by gravimetric analysis and impedance spectroscopy*. Materials and Corrosion, 65(3), 267-275.

<sup>266</sup> Yan, Y. F., Xu, X. Q., Zhou, D. Q., Wang, H., Wu, Y., Liu, X. J., & Lu, Z. P. (2013). *Hot corrosion behaviour and its mechanism of a new alumina-forming austenitic stainless steel in molten sodium sulphate*. Corrosion Science, 77, 202-209.

<sup>267</sup> McConohy, G., & Kruienga, A. (2014). *Molten nitrate salts at 600 and 680° C: Thermophysical property changes and corrosion of high-temperature nickel alloys*. Solar Energy, 103, 242-252.

anterior es que las aleaciones base níquel pueden soportar la corrosión hasta unas temperaturas en torno a los 600°C pero la sal solar no se mantendría con sus propiedades óptimas.

Otros aceros inoxidable como 316L y 310S también han sido testados<sup>268</sup> frente a sales (52% molar  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  – 48% molar  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a alta temperatura (entre 520 ° C y 650 ° C) encontrando resultados de corrosión aceptables.

---

<sup>268</sup> Chung, S. J., Park, J. H., Li, D., Ida, J. I., Kumakiri, I., & Lin, J. Y. (2005). *Dual-phase metal-carbonate membrane for high-temperature carbon dioxide separation*. Industrial & engineering chemistry research, 44(21), 7999-8006.

# CAPÍTULO VI

## **6.MODELIZACIÓN Y RESULTADOS.**

## **6.1. Modelado, para su inclusión en el software Simapro, de los materiales involucrados en el estudio. Inventarios de ciclo de vida.**

### **6.1.1. Aceros.**

Para la modelización de los aceros de esta tesis doctoral en SimaPro, se ha partido de procesos previamente predefinidos en la base de datos Ecoinvent 3<sup>269</sup>, modificando los mismos y adaptándolos a las composiciones específicas de los materiales que se precisan estudiar.

En particular han sido dos los procesos de los que se ha partido, un acero inoxidable y un acero bajo aleado, para su adecuación a los cuatro aceros que se van a someter a análisis.

A continuación se presentan las suposiciones que se han tomado:

Los procesos de producción de acero que se han tomado de dicha base de datos son procesos en los que Ecoinvent recopila información entre enero de 2001 y marzo de 2013 de numerosas plantas de producción de acero de toda Europa<sup>270</sup>. Se toman procesos con horno convertidor de oxígeno básico. Incluyen transportes de metal caliente y otros materiales de entrada al convertidor, el proceso de fundición y la fabricación de acero. Los aceros de partida tienen un carácter atribucional y basados en procesos unitarios.

Como entradas, se variaron las composiciones de los aceros y se mantuvieron los flujos de energía, agua, los procesos en el horno y el gasto en gas natural igual que en los procesos de base de datos. Del mismo modo, se mantuvieron las emisiones al aire y al agua que Ecoinvent considera para 1kg de acero.

---

<sup>269</sup> Weidema, B. P., Bauer, C., Hischier, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., & Wernet, G. (2013). *The ecoinvent database: Overview and methodology, Data quality guideline for the ecoinvent database version 3*. Ecoinvent.

<sup>270</sup> Classen, M., Althaus, H. J., Blaser, S., Tuchscheid, M., Jungbluth, N., Doka, G., & Scharnhorst, W. (2009). *Life cycle inventories of metals*. Final report ecoinvent data v2, 1(10).

AISI 316		
<b>Entradas</b>		
Silicio metálico	3,6	g
Azufre	0,02	g
Fósforo	0,25	g
Manganeso	12	g
Molibdeno	21,4	g
Carbono	0,3	g
Cobalto	1,2	g
Níquel	105,5	g
Cobre	2,5	g
Nitrógeno	0,4	g
Titanio	0,22	g
Estaño	0,7	g
Cromo	160,88	g
Fragmentos de hierro, cortados y prensados	0,5	kg
Arrabio	0,16925	kg
Oxígeno	0,07145	kg
Horno de oxígeno básico	1,33E-11	p
Dolomita	0,00275	kg
Polvo, del acero aleado en horno de arco eléctrico	-0,0010625	kg
Cal viva	0,0425	kg
Residuos inertes, para su disposición final	-0,0029	kg
Residuos de horno de oxígeno	-0,032077	kg
Agua	0,00452085	m <sup>3</sup>
Coque	0,00025	MJ
Gas natural, alta presión	9,62E-04	m <sup>3</sup>
Electricidad, media tensión	0,021944	kWh
<b>Emisiones al aire</b>		
Cobre	2,50E-08	kg
Óxidos de nitrógeno	1,25E-05	kg
Materia particulada, < 2.5 um	4,75E-05	kg
Vapor de agua	0,00253167	m <sup>3</sup>
Dióxido de carbono	0,0756	kg
Dioxin, 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-	3,05E-14	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1,20E-10	kg
Cromo	1,85E-07	kg
Manganeso	6,05E-07	kg
Monóxido de carbono	0,00473	kg
Plomo	5,15E-07	kg
<b>Vertidos al agua</b>		
Agua	0,00198917	m <sup>3</sup>

Tabla 38. Inventario de ciclo de vida para 1kg de acero AISI316.

T22		
<b>Entradas</b>		
Silicio metálico	5	g
Azufre	0,25	g
Fósforo	0,25	g
Manganeso	4	g
Molibdeno	9	g
Carbono	1	g
Cromo	20	g
Fragmentos de hierro, cortados y prensados	0,5	kg
Arrabio	0,4605	kg
Oxígeno	0,07145	kg
Horno de oxígeno básico	1,33E-11	p
Dolomita	0,00275	kg
Polvo, del acero aleado en horno de arco eléctrico	-0,0010625	kg
Cal viva	0,0425	kg
Residuos inertes, para su disposición final	-0,0029	kg
Residuos de horno de oxígeno	-0,032077	kg
Agua	0,00452085	m <sup>3</sup>
Coque	0,00025	MJ
Gas natural, alta presión	9,62E-04	m <sup>3</sup>
Electricidad, media tensión	0,021944	kWh
<b>Emisiones al aire</b>		
Cobre	2,50E-08	kg
Óxidos de nitrógeno	1,25E-05	kg
Materia particulada, < 2.5 um	4,75E-05	kg
Vapor de agua	0,00253167	m <sup>3</sup>
Dióxido de carbono	0,0756	kg
Dioxin, 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-	3,05E-14	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1,20E-10	kg
Cromo	1,85E-07	kg
Manganeso	6,05E-07	kg
Monóxido de carbono	0,00473	kg
Plomo	5,15E-07	kg
<b>Vertidos al agua</b>		
Agua	0,00198917	m <sup>3</sup>

Tabla 39. Inventario de ciclo de vida para 1kg de acero T22



<b>P92</b>		
<b>Entradas</b>		
Niobio	0,6	g
Tungsteno	1,8	g
Vanadio	1,7	g
Zirconio	0	g
Boro	0,03	g
Silicio metálico	2,1	g
Azufre	0,02	g
Fósforo	0,14	g
Manganeso	4,9	g
Molibdeno	3,8	g
Carbono	1,2	g
Níquel	1,7	g
Nitrógeno	0,53	g
Titanio	0	g
Aluminio	0,1	g
Cromo	87	g
Fragmentos de hierro, cortados y prensados	0,5	kg
Arrabio	0,37898	kg
Oxígeno	0,07145	kg
Horno de oxígeno básico	1,33E-11	p
Dolomita	0,00275	kg
Polvo, del acero aleado en horno de arco eléctrico	-0,0010625	kg
Cal viva	0,0425	kg
Residuos inertes, para su disposición final	-0,0029	kg
Residuos de horno de oxígeno	-0,032077	kg
Agua	0,00452085	m <sup>3</sup>
Coque	0,00025	MJ
Gas natural, alta presión	9,62E-04	m <sup>3</sup>
Electricidad, media tensión	0,021944	kWh
<b>Emisiones al aire</b>		
Cobre	2,50E-08	kg
Óxidos de nitrógeno	1,25E-05	kg
Materia particulada, < 2.5 um	4,75E-05	kg
Vapor de agua	0,00253167	m <sup>3</sup>
Dióxido de carbono	0,0756	kg
Dioxin, 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-	3,05E-14	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1,20E-10	kg
Cromo	1,85E-07	kg
Manganeso	6,05E-07	kg
Monóxido de carbono	0,00473	kg
Plomo	5,15E-07	kg
<b>Vertidos al agua</b>		
Agua	0,00198917	m <sup>3</sup>

Tabla 40. Inventario de ciclo de vida para 1kg de acero P92

A516		
<b>Entradas</b>		
Niobio	0,1	g
Silicio metálico	4	g
Azufre	0,08	g
Fósforo	0,15	g
Manganeso	9,5	g
Molibdeno	0,8	g
Carbono	1,8	g
Cobalto	0,1	g
Níquel	3	g
Cobre	3	g
Nitrogeno	0,2	g
Titanio	0,3	g
Estaño	0,2	g
Cromo	3	g
Fragmentos de hierro, cortados y prensados	0,5	kg
Arrabio	0,44587	kg
Oxígeno	0,07145	kg
Horno de oxígeno básico	1,33E-11	p
Dolomita	0,00275	kg
Polvo, del acero aleado en horno de arco eléctrico	-0,0010625	kg
Cal viva	0,0425	kg
Residuos inertes, para su disposición final	-0,0029	kg
Residuos de horno de oxígeno	-0,032077	kg
Agua	0,00452085	m <sup>3</sup>
Coque	0,00025	MJ
Gas natural, alta presión	9,62E-04	m <sup>3</sup>
Electricidad, media tensión	0,021944	kWh
<b>Emisiones al aire</b>		
Cobre	2,50E-08	kg
Óxidos de nitrógeno	1,25E-05	kg
Materia particulada, < 2.5 um	4,75E-05	kg
Vapor de agua	0,00253167	m <sup>3</sup>
Dióxido de carbono	0,0756	kg
Dioxin, 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-	3,05E-14	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1,20E-10	kg
Cromo	1,85E-07	kg
Manganeso	6,05E-07	kg
Monóxido de carbono	0,00473	kg
Plomo	5,15E-07	kg
<b>Vertidos al agua</b>		
Agua	0,00198917	m <sup>3</sup>

Tabla 41. Inventario de ciclo de vida para 1kg de acero A516

Las tablas precedentes (Tabla 38, Tabla 39, Tabla 40 y Tabla 41) representan el Inventario de Ciclo de Vida de cada uno de los aceros que se están analizando en esta tesis, siempre para 1kg de material de salida. Corresponden a las entradas y salidas para su producción.

Como se puede comprobar, en todas ellas, en las primeras líneas de las mismas, se encuentran las composiciones de sustancias necesarias para 1kg de acero. Se puede apreciar que corresponden con las composiciones en aportadas en capítulos precedentes.

Se ha considerado que los aceros son producidos en un horno de oxígeno básico. Así pues, en el inventario aparecerán las entradas y salidas relacionadas con el mismo. Por ejemplo, se incluye la utilización de una parte de un horno de oxígeno básico (en concreto se asume que para la producción de 1kg de acero, se necesita  $1,33 \times 10^{-11}$  partes de un horno). Todas las suposiciones de este tipo tienen su fundamento en el hecho de tomar un proceso de la base de datos Ecoinvent 3 y adaptarlo, por ello, lo que se supuso fue dejar estas variables tal y como Ecoinvent 3 consideraba.

El proceso de horno de oxígeno básico se distingue por hacer uso de hierro antiguo para fabricar acero nuevo, así que es necesario balancear la carga, lo cual se hace en una proporción aproximada de 50%, que es lo que aparece representado en las tablas como fragmentos de hierro y arrabio. El hierro es fundido en un horno, posteriormente es vertido en un contenedor.

Una vez en el contenedor, se le inyecta oxígeno, el carbono se disuelve en el acero y se forma monóxido de carbono y dióxido de carbono, la temperatura alcanza cerca de los 1700°C. Una vez fundido, el metal reduce su contenido de carbono.

Se mezcla cal viva y dolomita para formar un tipo de residuo que absorbe las impurezas en el proceso de fabricación del acero. Y finalmente, al acero se le añaden los productos de aleación requeridos.

El coque se utiliza en los hornos para la eliminación de oxígeno del producto final, así como la posible reducción de óxidos metálicos que pudieran formarse.

Todo el proceso considerado tiene un gasto de agua, de gas natural y de electricidad asociados, que aparecen, también reflejados en las tablas.

Como salidas se aprecian una serie de emisiones por chimenea. Las empresas europeas están obligadas a declarar sus emisiones y gracias a ello se dispone de esta información. Las emisiones del inventario están referidas a 1kg de producto, es decir, se ha asignado del total de las emisiones de las fábricas en cuestión, tan solo la parte proporcional al proceso de producción de 1kg de acero. Del mismo modo, como vertidos al agua solo se tiene agua propiamente dicha una vez se haya utilizado para la refrigeración de los productos u otras aplicaciones.

Con todo ello, se procederá a evaluar los impactos que generan entradas y salidas en el medio ambiente.

### 6.1.2. Fluidos de transferencia de calor.

El inventario de ciclo de vida de las sales fundidas es más sencillo pues no requiere de procesos, como puede ser el de fundición, para los aceros.

Así pues en las tablas: Tabla 42, Tabla 43 y Tabla 44, se tienen los siguientes inventarios para los tres fluidos a estudiar, de nuevo, se modela 1kg de salida.

#### **Entradas para 1 kg de sal solar binaria**

Nitrato sódico	Nitrato potásico
600 g	400 g

Tabla 42. Inventario de Ciclo de Vida para 1kg de salida de Sal solar binaria.

#### **Entradas para 1 kg de sal solar Hitec**

Nitrato sódico	Nitrato potásico	Nitrito sódico
70 g	530 g	400 g

Tabla 43. Inventario de Ciclo de Vida para 1kg de salida de Sal solar Hitec.

#### **Entradas para 1 kg de aceite Therminol**

Óxido de difenilo	Bifenilo
735 g	265 g

Tabla 44. Inventario de Ciclo de Vida para 1kg de salida de aceite Therminol.

Cabe destacar que se han conformado tanto el aceite Therminol, como la sal solar binaria como la sal Hitec a partir de sus componentes. Dichos componentes son procesos de la base de datos Ecoinvent 3, por lo tanto llevan asociados aguas abajo todo los subprocesos de producción. Es decir, por ejemplo, las sales tienen una cantidad de nitrato potásico, y la producción del nitrato potásico lleva asociada, a su

vez, todos los subprocesos que la componen, tales como ácido nítrico, cloruro potásico y los procesos químicos mediante los que se consigue la producción del nitrato. Así con cada uno de los componentes de las sales y el aceite Therminol. Se explica todo ello de cara al momento de mostrar resultados, en los que aparecerán procesos que no son estrictamente de componentes de las sales y aceite sino de los subprocesos que conforman los mismos.

## **6.2. Evaluación de Impacto de materiales. Procesos unitarios. Método CML.**

Una vez se ha procedido a la elaboración del Inventario de Ciclo de Vida, se introducen los datos en el software Simapro para obtener resultados en forma de categorías de impacto.

En este proceso las entradas al programa son traducidas a potenciales peligros sobre el medio ambiente.

Antes de realizar la evaluación completa de las cantidades de material implicadas en una central termosolar cilindro parabólica, se ha considerado un aporte esencial establecer cuáles son los componentes de cada material bajo estudio que afectan en mayor o menor medida a las categorías elegidas.

El método de evaluación de impacto escogido es CML-IA, del cual se ha descrito su fundamento teórico en el Capítulo 4.3.3.3 de esta tesis.

A continuación se presentan los siguientes impactos para cada uno de los aceros:

- Agotamiento de recursos abióticos
- Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)
- Cambio Climático (GWP100)
- Agotamiento del ozono estratosférico
- Toxicidad humana
- Ecotoxicidad terrestre
- Formación de oxidación fotoquímica
- Acidificación
- Eutrofización

Se caracterizan todos ellos y se normalizan para conocer cuál es más impactante que otro.

### 6.2.1. Acero AISI 316. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados.

Los resultados obtenidos en el Análisis de Ciclo de Vida de 1kg de acero AISI316 se expresan numéricamente en la Tabla 45.

Categoría de impacto	Unidad	Total
Agotamiento de recursos abióticos	kg Sb eq	0,00100367
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	MJ	90,836373
Cambio Climático (GWP100)	kg CO2 eq	7,0923415
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC-11 eq	4,25E-07
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	83,364963
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,03339425
Formación de oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	0,00883101
Acidificación	kg SO2 eq	0,22492797
Eutrofización	kg PO4--- eq	0,19850642

Tabla 45. Caracterización del 1kg de acero 316.

La caracterización de impacto no arroja información sobre cuáles de las categorías tienen una mayor contribución al daño ambiental, sino que las cuantifica, caracterizando, como su nombre indica el material por sus impactos.

Para tener una idea de cuál de las categorías estudiadas es la más acuciante y la que impacta con una mayor contribución al global del medio ambiente, se lleva a cabo una normalización de las mismas, que, tal y como se ha comentado en capítulos precedentes consiste en obtener la relación entre el aporte del sistema estudiado frente a un cómputo general. Así pues, se normalizan los impactos y se expresan sus resultados en la Tabla 46.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Total</b>
Agotamiento de recursos abióticos	1,18E-11
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	2,89E-12
Cambio Climático (GWP100)	1,41E-12
Agotamiento del ozono estratosférico	4,76E-15
Toxicidad humana	1,08E-11
Ecotoxicidad terrestre	6,88E-13
Formación de oxidación fotoquímica	1,04E-12
Acidificación	7,98E-12
Eutrofización	1,50E-11

Tabla 46. Normalización de 1kg de acero 316.

La información que aporta la normalización permite realizar juicios comparativos. Así pues, lo que se deduce de ella es que la categoría de impacto más problemática es la eutrofización. Seguida del agotamiento de los recursos abióticos, la toxicidad humana, la acidificación, el agotamiento de recursos abióticos (basados en combustibles fósiles, el cambio climático, y con una contribución prácticamente despreciable frente a las demás se encuentra el agotamiento del ozono estratosférico, la ecotoxicidad y la formación de oxidación fotoquímica.

Para tener una información más detallada de lo que sucede en cada categoría de impacto, se recurre a la expresión de resultados en forma de gráficas. No sería una información completa si no se expresa el porqué de que una categoría tenga contribuciones más altas que otras.

La caracterización, expresada de un modo visual, se representa en la Figura 46; en ella, cada categoría de impacto representa el 100% y, dentro de cada una de las barras, se aprecian los diferentes aportes a dicha categoría, a causa de los elementos que componen el acero estudiado. Con todo ello, se aprecia como en la eutrofización, el molibdeno es el elemento que tiene un peso superior sobre el resto, estando en torno al 85% del impacto. Esto quiere decir que la causa de la eutrofización que se asocia a la producción de 1 kg de acero AISI316 es, en un 85%, debida al molibdeno.

Del mismo modo, el molibdeno es el principal agente en el agotamiento de los recursos abióticos y en la toxicidad humana.

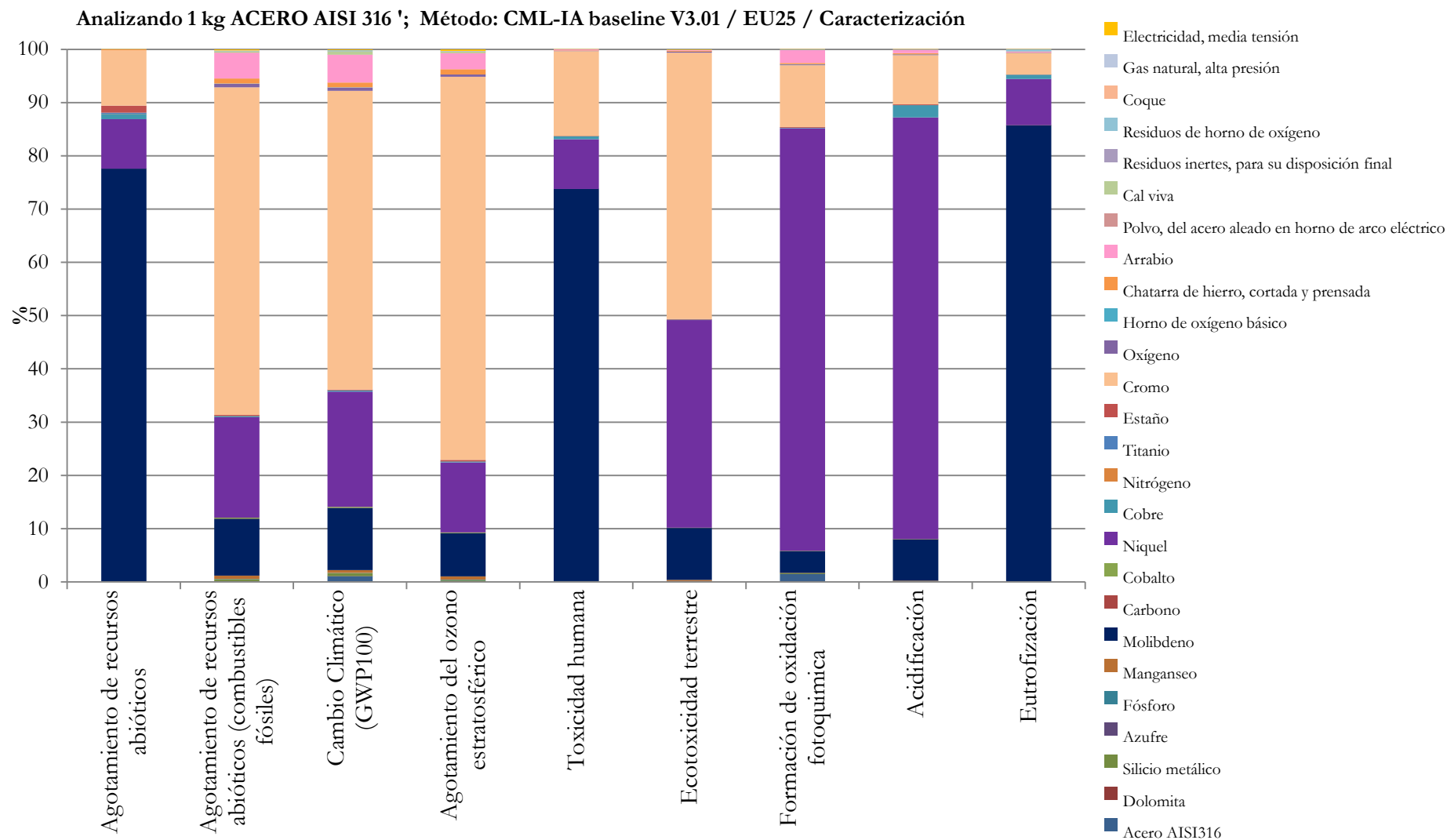


Figura 46. Caracterización de 1kg de acero 316 formato gráfica.



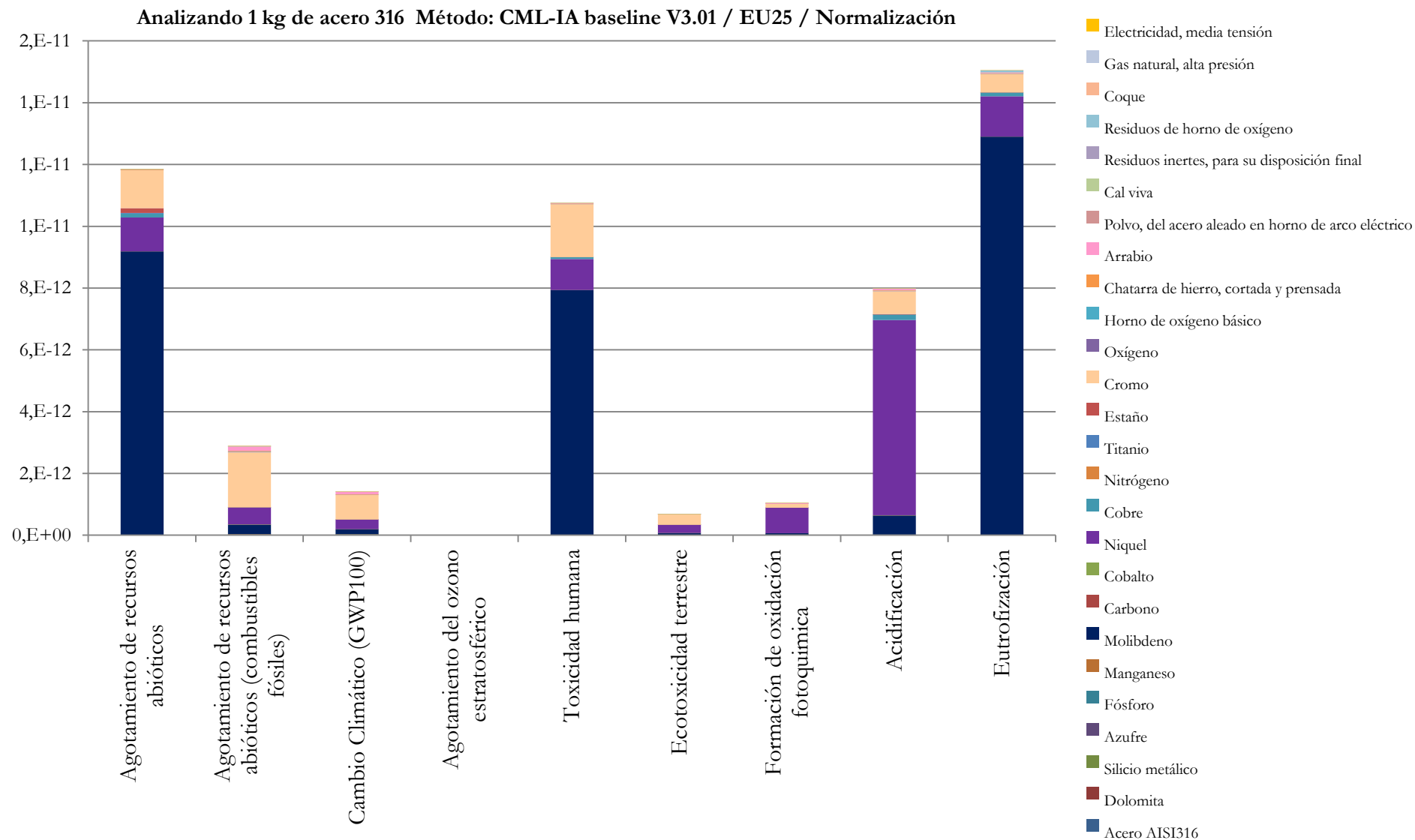


Figura 47. Normalización de 1kg de acero 316 formato gráfica.

La Figura 46 muestra la caracterización de 1kg de acero AISI 316. Se puede apreciar que el molibdeno es un agente presente en todas las categorías de impacto. En aquellas que aparece con una mayor significancia son el agotamiento de los recursos abióticos, la toxicidad humana y la eutrofización.

Del mismo modo aparece el níquel con contribuciones muy elevadas en las categorías acidificación, formación de oxidación fotoquímica y ecotoxicidad terrestre.

El cromo no pasa desapercibido, el agotamiento de los recursos (combustibles fósiles) tiene en gran medida su causa por este componente, así como las categorías de cambio climático, agotamiento del ozono estratosférico y la ecotoxicidad terrestre.

El hierro, representado por los elementos denominados arrabio y chatarra de hierro, cortada y prensada, se aprecia cómo, pese a su alto porcentaje en el material de base, no afecta a las categorías de impacto en demasía.

La Figura 47 presenta la normalización de 1 kg de acero AISI 316. En ella se puede apreciar cómo la categoría que representa un impacto superior al resto es la eutrofización, seguida del agotamiento de los recursos abióticos y de la toxicidad humana. En estas tres categorías de impacto, el elemento predominante, es decir, el que aporta el grueso del impacto, es el molibdeno y en las tres se aprecia cómo tanto el cromo como el níquel, tienen una contribución menor pero considerable.

La acidificación es causada, principalmente, por el elemento níquel.

Cabe destacar que la categoría de agotamiento del ozono estratosférico es prácticamente inapreciable en relación con las demás consideradas.

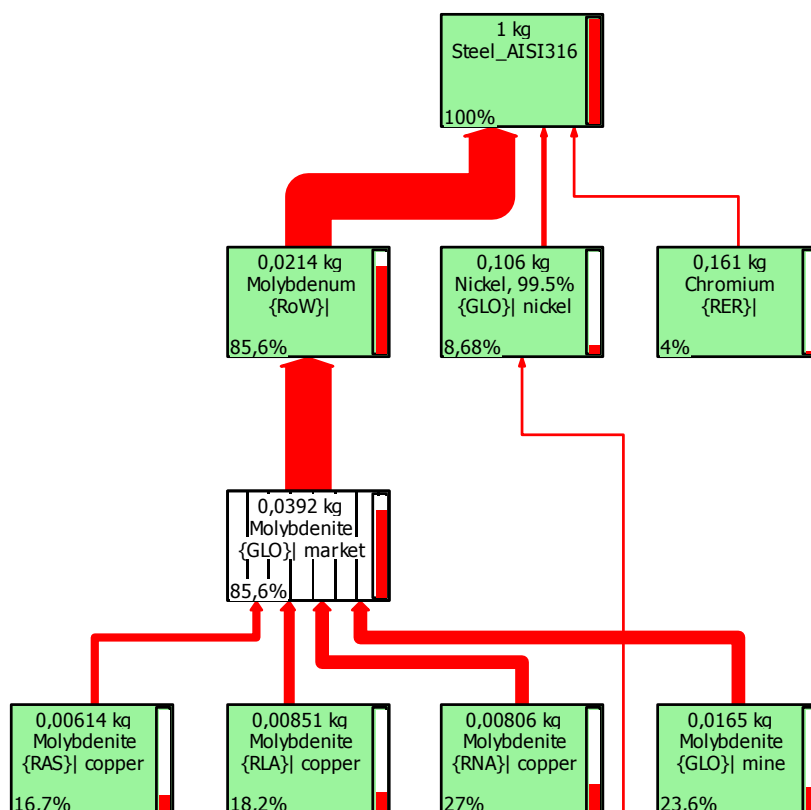


Figura 48. ACV de 1kg de acero 316. Red de la categoría de impacto Eutrofización. No todos los procesos están a la vista. Valor de corte:7,96%

En la Figura 1Figura 48 se ha representado la red de la categoría de impacto más significativa, es decir, la eutrofización. En ella se aprecia que el molibdeno supone un 85,6% de la misma, un 8,68% el níquel y un 0,161% el cromo. A su vez, se aprecia cómo la molibdenita que se requiere para la producción de acero es el elemento principal que aporta eutrofización al sistema.

Un 2,14% de molibdeno es el porcentaje de éste en el acero AISI 316. Esa pequeña fracción es la responsable del aproximadamente 85% de los 0,19850642 kg PO4--- eq que potencialmente se producen como eutrofización a causa de la producción de 1 kg de acero AISI316.

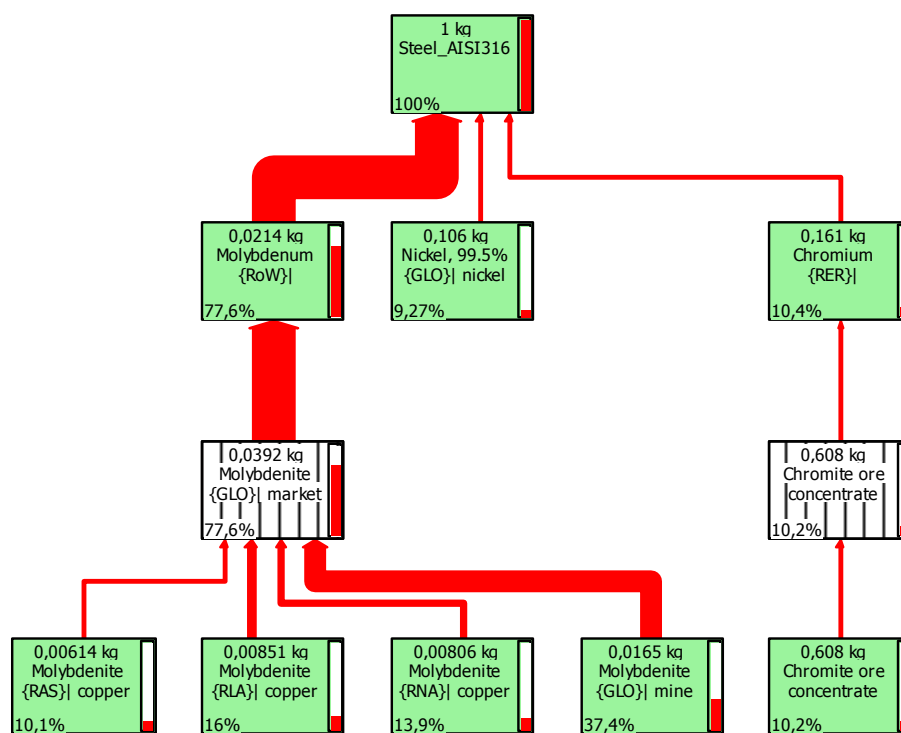


Figura 49. ACV de 1kg de acero 316. Red de la categoría de impacto Agotamiento recursos abióticos.

No todos los procesos están a la vista. Valor de corte:2,55%

El agotamiento de los recursos abióticos es la segunda categoría más impactante de las consideradas, para el caso de 1kg de acero 316. En su mayor medida viene producido por el Mo con un 77,6% del aporte al total. Si se observa la red de esta categoría, representada en la Figura 49 se pueden visualizar los flujos que cada uno de los componentes representados aportan al total del sistema. En el caso del molibdeno, que vuelve a ser el elemento más dañino en esta categoría, se ve cómo la molibdenita es, a su vez, la causante de su impacto. De la misma manera, la contribución del 10,4% del cromo, tiene su principal causante en la cromita.

En las redes se pueden apreciar numerosos detalles como son los aportes en peso sobre el producto final y las contribuciones de los elementos aguas debajo de los propios subelementos conformantes. En toda red se coloca un valor de corte y todos los impactos que queden por debajo del mismo no aparecen.

### 6.2.2. Acero T22. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados.

Categoría de impacto	Unidad	Total
Agotamiento de recursos abióticos	kg Sb eq	0,0003425
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	MJ	26,147538
Cambio Climático (GWP100)	kg CO2 eq	2,189311
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC-11 eq	9,99E-08
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	28,087933
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,0038542
Formación de oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	0,00106377
Acidificación	kg SO2 eq	0,01544112
Eutrofización	kg PO4--- eq	0,07484805

Tabla 47. Caracterización del 1kg de acero T22.

Categoría de impacto	Total
Agotamiento de recursos abióticos	4,04E-12
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	8,31E-13
Cambio Climático (GWP100)	4,36E-13
Agotamiento del ozono estratosférico	1,12E-15
Toxicidad humana	3,62E-12
Ecotoxicidad terrestre	7,94E-14
Formación de oxidación fotoquímica	1,26E-13
Acidificación	5,48E-13
Eutrofización	5,67E-12

Tabla 48. Normalización de 1kg de acero T22.

En la Tabla 47 se representa la caracterización de 1kg de acero T22 y en Tabla 48 la normalización del mismo, ambas, por el método CML, obteniendo las categorías de impacto que se aprecian en ellas.

Del mismo modo que anteriormente, se procede a representar estos impactos en forma de gráfica con el objetivo de tener una visión más enfocada al detalle de cada uno de ellos y conocer los elementos que suponen mayores aportes.

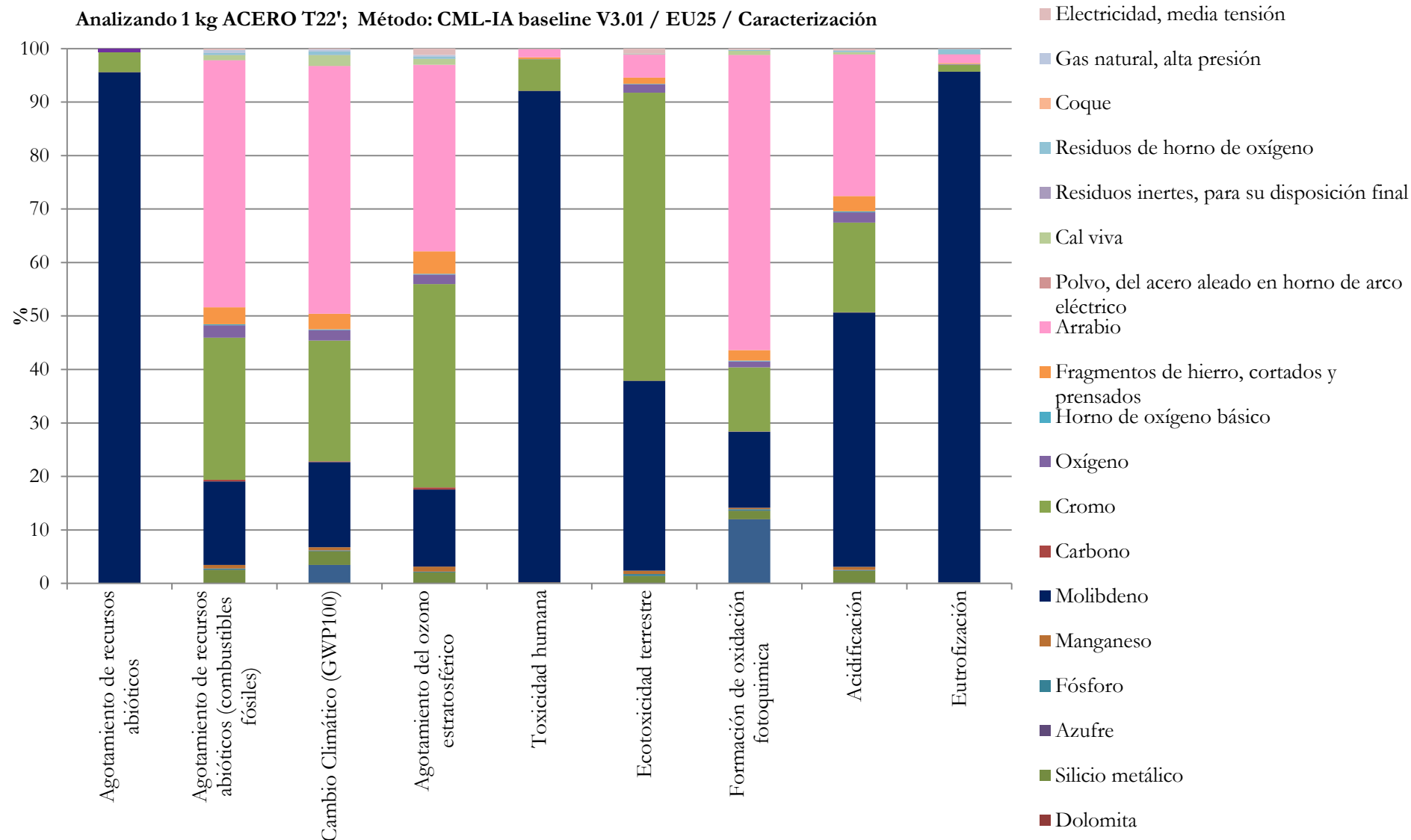


Figura 50. Caracterización de 1kg de acero T22 formato gráfica.

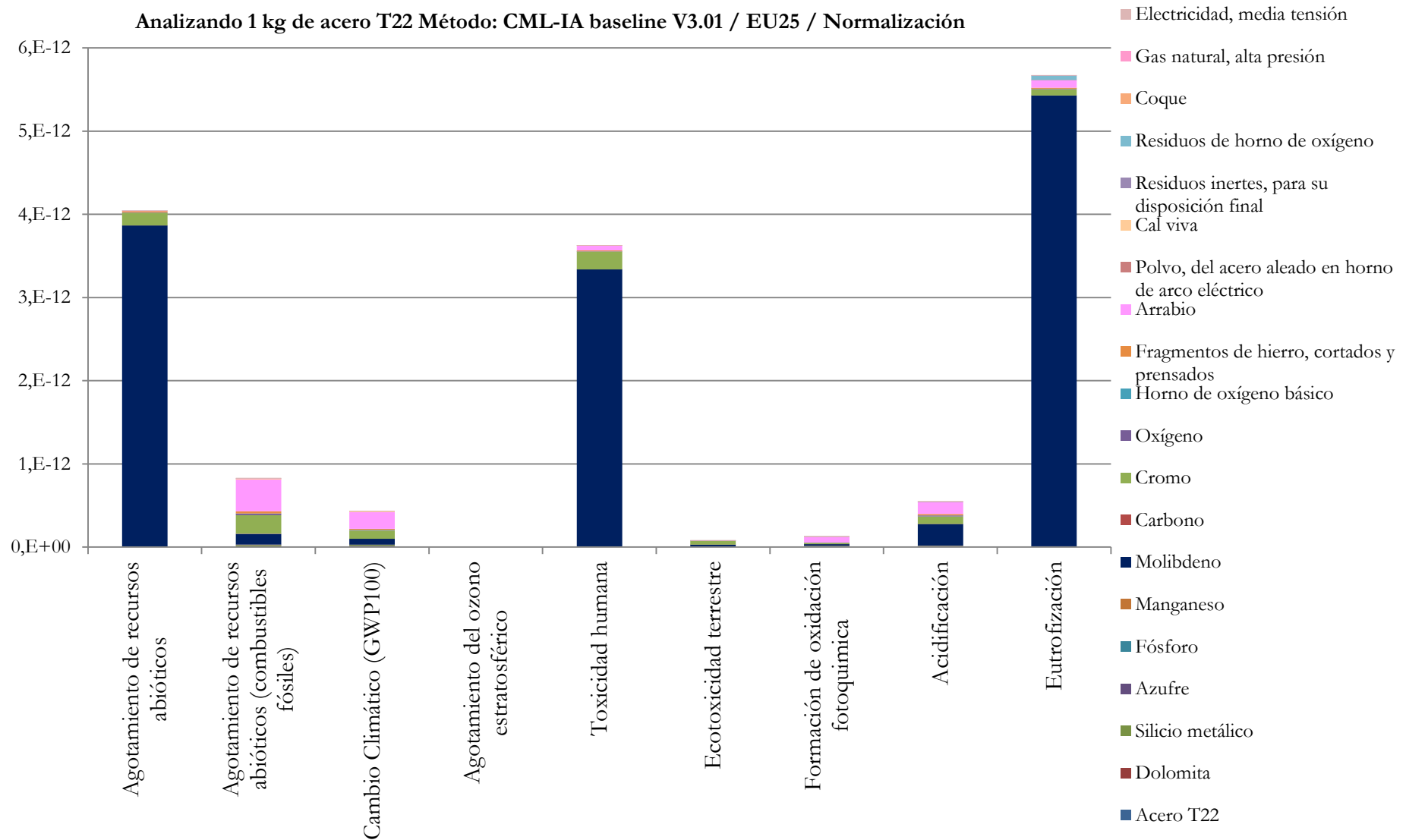


Figura 51. Normalización de 1kg de acero T22 formato gráfica.

En el caso del acero T22 se aprecia un cambio en los elementos que producen impactos y cómo lo hacen. Hay que tener en cuenta que una variación en la composición de un material puede suponer grandes variaciones en los resultados.

En el caso de la caracterización del acero T22, lo que se puede ver en la Figura 50 es

Que el molibdeno es el elemento que tiene aportes superiores al 90% en agotamiento de los recursos abióticos, toxicidad humana y eutrofización, sin despreciar los aportes que provoca a las categorías de ecotoxicidad terrestre y acidificación, ambos superiores al 30%. Se aprecia cómo el solo 0,9 % en peso que conforma de Mo que forma parte del acero T22, tiene consecuencias destacables en numerosas categorías de impacto medioambiental.

El arrabio, que consta con 0,474 kg para 1kg de acero T22, tal y como puede verse en la tabla de inventario del mismo (Tabla 39), tiene contribuciones importantes en cierto impactos como son el agotamiento de los recursos abióticos (combustibles fósiles), el cambio climático, el agotamiento del ozono estratosférico o la formación de oxidación fotoquímica.

El cromo presenta sustanciales aportes en categorías como ecotoxicidad terrestre, agotamiento del ozono estratosférico, cambio climático y agotamiento de los recursos (combustibles fósiles).

Ahora bien, será en la normalización, donde se pueda definir si contribuciones a un impacto elevadas, lo son también al global. Por todo ello, se representa la Figura 51, en la que se puede ver claramente cómo aquellos aporte del arrabio al cómputo final quedan representados de un modo que su significancia se puede considerar descartable si se compara, por ejemplo, con el molibdeno, el cual marca la tendencia en lo que son, además, las categorías más impactantes, es decir, el caso del molibdeno es digno de estudio ya que no solo aporta más del 90% de la contribución relativa a varios impactos sino que hace de ellos los más impactantes respecto al resto. Todo ello, en el caso del acero T22, es producido con una composición en peso en el mismo de, tan solo, el 0,9%.



La Figura 51, expone la normalización de 1kg de acero de manera gráfica. En ella se aprecia claramente cómo el agotamiento de los recursos abióticos, la toxicidad humana y la eutrofización son las categorías con una mayor problemática medioambiental.

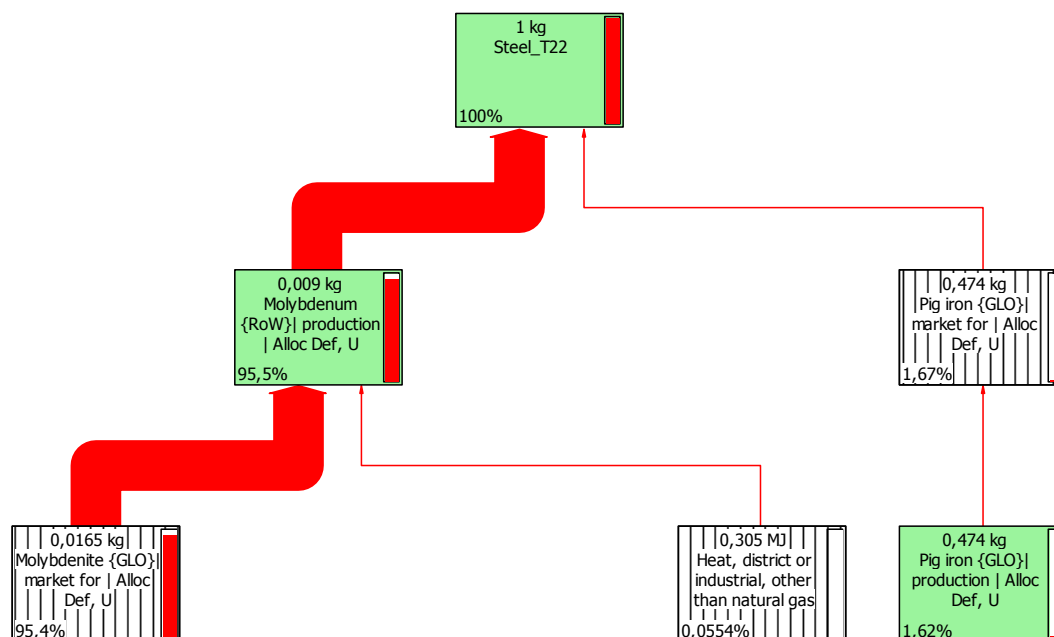


Figura 52. ACV d 1kg de acero T22. Red de la categoría de impacto Eutrofización. No todos los procesos están a la vista. Valor de corte:1,61%

La eutrofización es la categoría de impacto para el acero T22, es por ello que se ha optado por obtener una representación de la misma en forma de red, se puede observar en la Figura 52. De nuevo la representación en red se expone en forma de flujos. Los mayores flujos proceden de los elementos que impactan con mayor aporte, este es el caso del molibdeno, en el cual se puede ver, que los 0,009 kg que conforman 1 kg de acero T22 son los causantes del 95,5% de la eutrofización que produce este material. Y el arrabio (al fin y al cabo hierro, Fe), 0,474 kg del kg de T22 analizado, tan solo aporta un 1,67% de la eutrofización. Con esto, se pone de manifiesto que pequeñas cantidades de una sustancia implican graves problemas medioambientales y otras se comportan de un modo más inerte en materia de sostenibilidad. En este caso serían el molibdeno y el arrabio respectivamente y de cara a los 0,075 kg de  $\text{PO}_4^{3-}_{\text{eq}}$  de eutrofización que supone 1kg de T22.

A su vez, en esta red se aprecia cómo para la eutrofización, la mayor contribución al impacto que produce el molibdeno, viene definida por la molibdenita en su mayor medida (95,4%), pero se aprecian otros elementos como es el calor que requiere el

proceso de formación del molibdeno; aparecen 0,305 MJ, que se traducen en un 0,0554% del impacto.

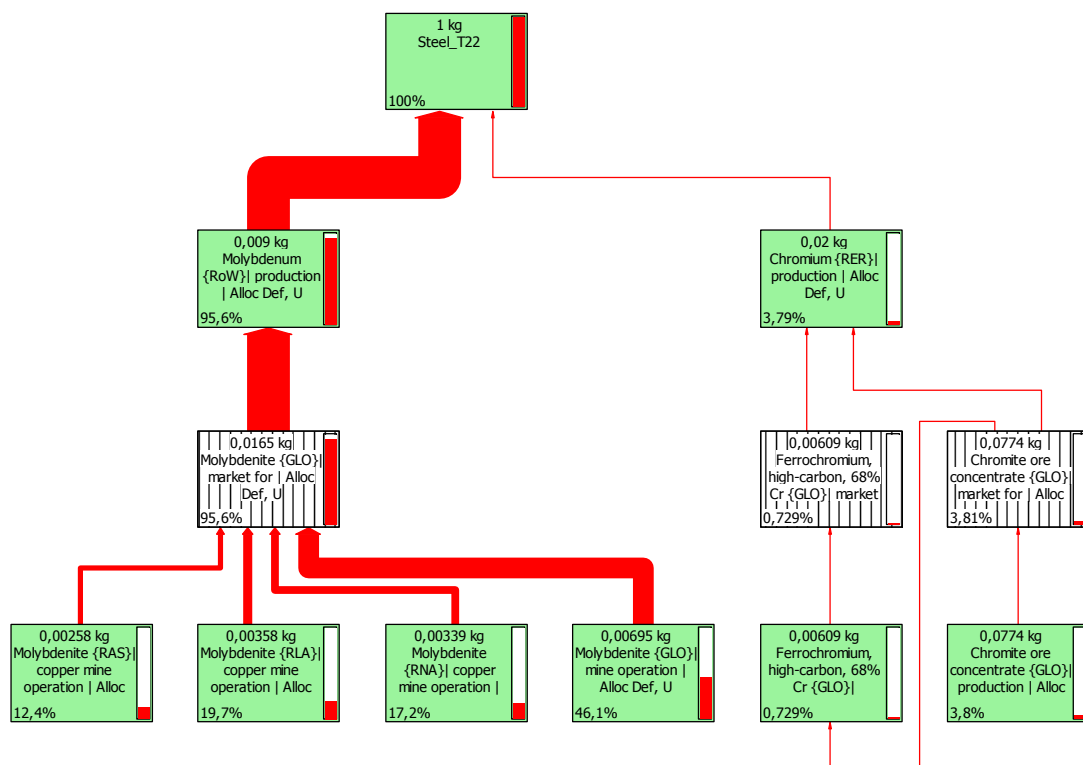


Figura 53. ACV d 1kg de acero T22. Red de la categoría de impacto Agotamiento recursos abióticos.

No todos los procesos están a la vista. Valor de corte: 0,729%

La Figura 53 se expone para pormenorizar los procesos que se ven implicados en la categoría, agotamiento de los recursos abióticos.

1kg de T22 supone los 0,0003425 kg de Sb eq, pues bien, analizando el detalle del que es segundo de los impactos más acuciantes del acero T22, se aprecia cómo, de nuevo el molibdeno es el que más representación tiene. 0,009 kg de Mo suponen un 95,6% del total de kg de Sb eq.

El cromo tiene un aporte al agotamiento de los recursos abióticos del 3,79%, viéndose ello en la parte derecha de la red, en la que se puede observar los subprocesos que componen el cromo como son el mineral cromita y el ferrocromo, ambos representados con sus respectivas contribuciones al impacto en cuestión.

### 6.2.3. Acero A516. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados.

A continuación se presenta la caracterización y normalización por el método CML de 1kg de acero A516. Los resultados de cada categoría de impacto están expresados en sus unidades correspondientes y son, en todo caso, relativos al impacto que produce 1kg de este acero. Se puede apreciar en la Tabla 49 y la Tabla 50.

Categoría de impacto	Unidad	Total
Agotamiento de recursos abióticos	kg Sb eq	5,48E-05
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	MJ	17,092209
Cambio Climático (GWP100)	kg CO2 eq	1,4928529
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC-11 eq	5,75E-08
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	3,9930038
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,00127292
Formación de oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	0,00101352
Acidificación	kg SO2 eq	0,01781282
Eutrofización	kg PO4--- eq	0,01131324

Tabla 49. Caracterización del 1kg de acero A516.

Categoría de impacto	Total
Agotamiento de recursos abióticos	6,46E-13
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	5,44E-13
Cambio Climático (GWP100)	2,97E-13
Agotamiento del ozono estratosférico	6,44E-16
Toxicidad humana	5,15E-13
Ecotoxicidad terrestre	2,62E-14
Formación de oxidación fotoquímica	1,20E-13
Acidificación	6,32E-13
Eutrofización	8,58E-13

Tabla 50. Normalización de 1kg de acero A516.

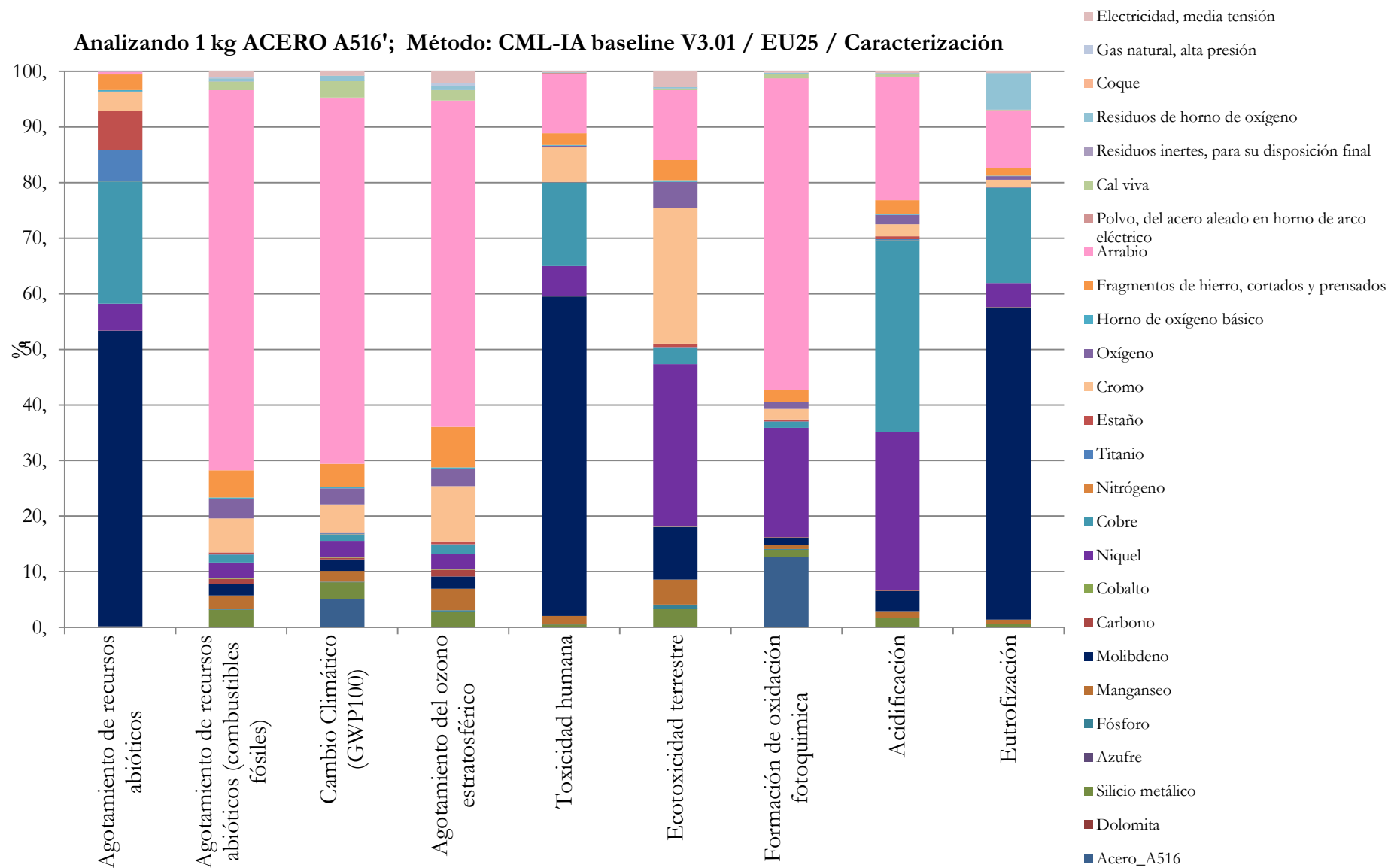


Figura 54. Caracterización de 1kg de acero A516 formato gráfica.

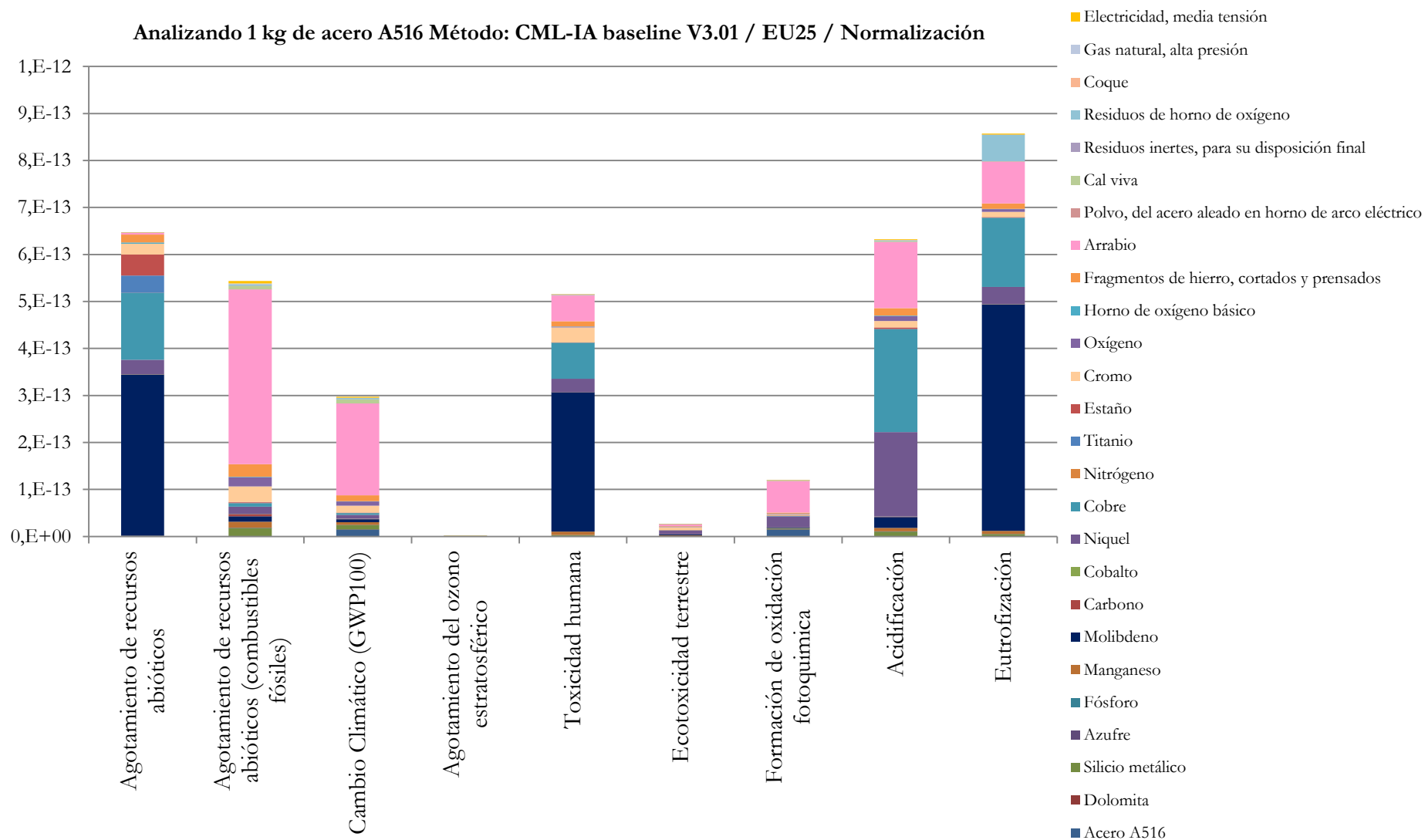


Figura 55. Normalización de 1kg de acero A516 formato gráfica.

Al igual que para los demás aceros, se representan los impactos producidos por el acero A516 de manera gráfica y con el detalle de los elementos que conforman cada impacto. Se puede ver en la Figura 54. Caracterización de 1kg de acero A516 formato gráfica. y la Figura 55.

El acero A516 presenta más variedad en el reparto de contribuciones de impacto que otros. La eutrofización sigue es, de nuevo, la categoría que tiene un comportamiento medioambiental más desfavorable, seguida del agotamiento de los recursos abióticos y la acidificación. Se puede apreciar cómo el molibdeno es el componente que más afecta tanto en eutrofización como en agotamiento abiótico pero por ejemplo, se puede afirmar que no es un gran causante de la acidificación. La acidificación, de hecho viene producida por el uso de níquel, cobre y el arrabio, con contribuciones las tres muy similares y en torno al 20%. Por ello se puede afirmar que a la categoría acidificación, no es el molibdeno el componente que peores resultados produce.

Del mismo modo, se aprecia cómo el arrabio tiene grandes aportes en los efectos de cambio climático y agotamiento de los combustibles fósiles, también en materia de formación de oxidación fotoquímica.

El cobre es un elemento que en el acero A516 tiene un 0,3%, al igual que el níquel (0,3% en peso), Se aprecia que para el mismo aporte en peso de dos elementos, los resultados son diferentes. El cobre es más dañino en eutrofización, acidificación, en toxicidad humana y en agotamiento de los recursos abióticos, que son, además, las categorías más impactantes.

Esto mismo sucede con el cromo, su contenido en peso es el mismo que el níquel y que el cobre, pero, se ve claramente en la gráfica de normalización, que los impactos que produce no son tan nocivos como los provocados por elementos con un aporte en peso igual. Con ello, lo que se pone de manifiesto es que, aunque el cromo había aparecido como un agente impactante en otros aceros, un cambio en la composición de ellos, hace que los impactos varíen. Y la elección de aleante, cada vez más, debe basarse en este tipo de criterios para tener una base de sostenibilidad en la que basarse. Por ello, sería una buena opción reducir los aleantes que producen grandes impactos e incrementar los que afectan en menor medida, para comparar qué efectos produce ello en la disminución de afecciones al medio ambiente.

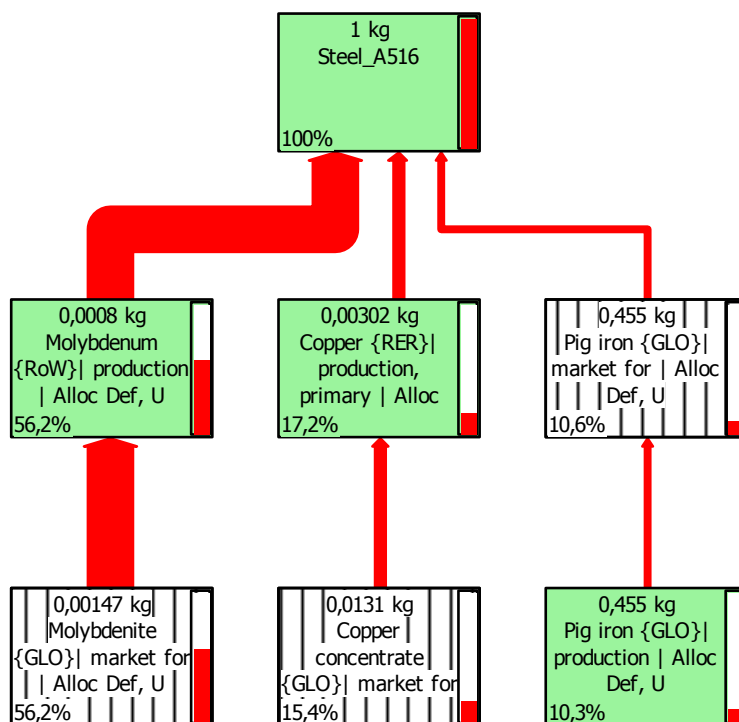


Figura 56. ACV d 1kg de acero A516. Red de la categoría de impacto Eutrofización. No todos los procesos están a la vista. Valor de corte:9,1%

La categoría más impactante para el acero A516 es la eutrofización. En la Figura 56, se muestra la red de caracterización de esta categoría de impacto para 1kg de este acero. El objetivo es analizar los flujos que la componen. Los aportes al 100% del impacto están repartidos, en primer lugar se encuentra el molibdeno con un aporte del 56%2, seguido del cobre, del que se puede afirmar que es el causante del 17,2% de la potencial eutrofización que produce 1kg de acero A516. Del mismo modo, el arrabio supone un10,6% de ello.

En una línea inferior, se pueden apreciar algunos de los subprocesos, con sus respectivos aportes al impacto global. Por ejemplo, la práctica totalidad del efecto que produce el molibdeno en el impacto final, viene definido por la producción de molibdenita.

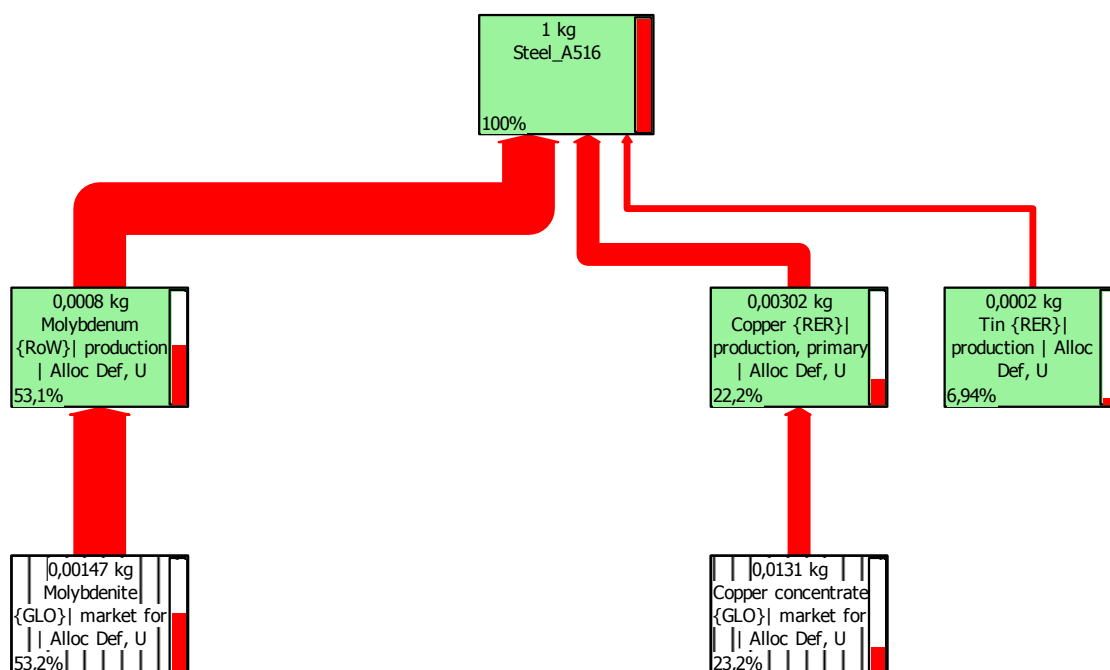


Figura 57. ACV d 1kg de acero A516. Red de la categoría de impacto Agotamiento abiótico. No todos los procesos están a la vista. Valor de corte:6,8%

El agotamiento abiótico representa la segunda categoría más problemática en el análisis de 1 kg de acero A516. En la Figura 57 aparece representada la red de caracterización de ella. Se puede apreciar cómo el agotamiento de los recursos abióticos que provoca 1 kg de acero A516, está definido por varios de sus aleantes. En un 53,1% la causa es el molibdeno, en un 22,2% es el cobre y en un 6,94% es el estaño. De nuevo se aprecia cómo aunque la composición en sobre el metal base sea tan solo de algunos gramos (0,08% Mo, 0,3% Ni, 0,02% Sn) los impactos que se producen en el medio ambiente son consecuencia directa, en prácticamente la totalidad, de ellos.



#### 6.2.4. Acero P92. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados.

A continuación se presentan las tablas de caracterización y normalización para el acero inoxidable P92. En ellas se puede comprobar su valor numérico. Se trata de la Tabla 51 para la caracterización de 1kg de acero P92 y la Tabla 52 en la que se normalizan los valores y se obtienen sus resultados.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>
Agotamiento de recursos abióticos	kg Sb eq	0,00020654
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	MJ	44,851325
Cambio Climático (GWP100)	kg CO2 eq	3,4590988
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC-11 eq	2,13E-07
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	18,744078
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,01017168
Formación de oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	0,00140225
Acidificación	kg SO2 eq	0,0218306
Eutrofización	kg PO4--- eq	0,03687134

Tabla 51. Caracterización del 1kg de acero P92.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Total</b>
Agotamiento de recursos abióticos	2,44E-12
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	1,43E-12
Cambio Climático (GWP100)	6,88E-13
Agotamiento del ozono estratosférico	2,38E-15
Toxicidad humana	2,42E-12
Ecotoxicidad terrestre	1,80E-11
Formación de oxidación fotoquímica	1,65E-13
Acidificación	7,75E-13
Eutrofización	2,79E-12

Tabla 52. Normalización de 1kg de acero P92.

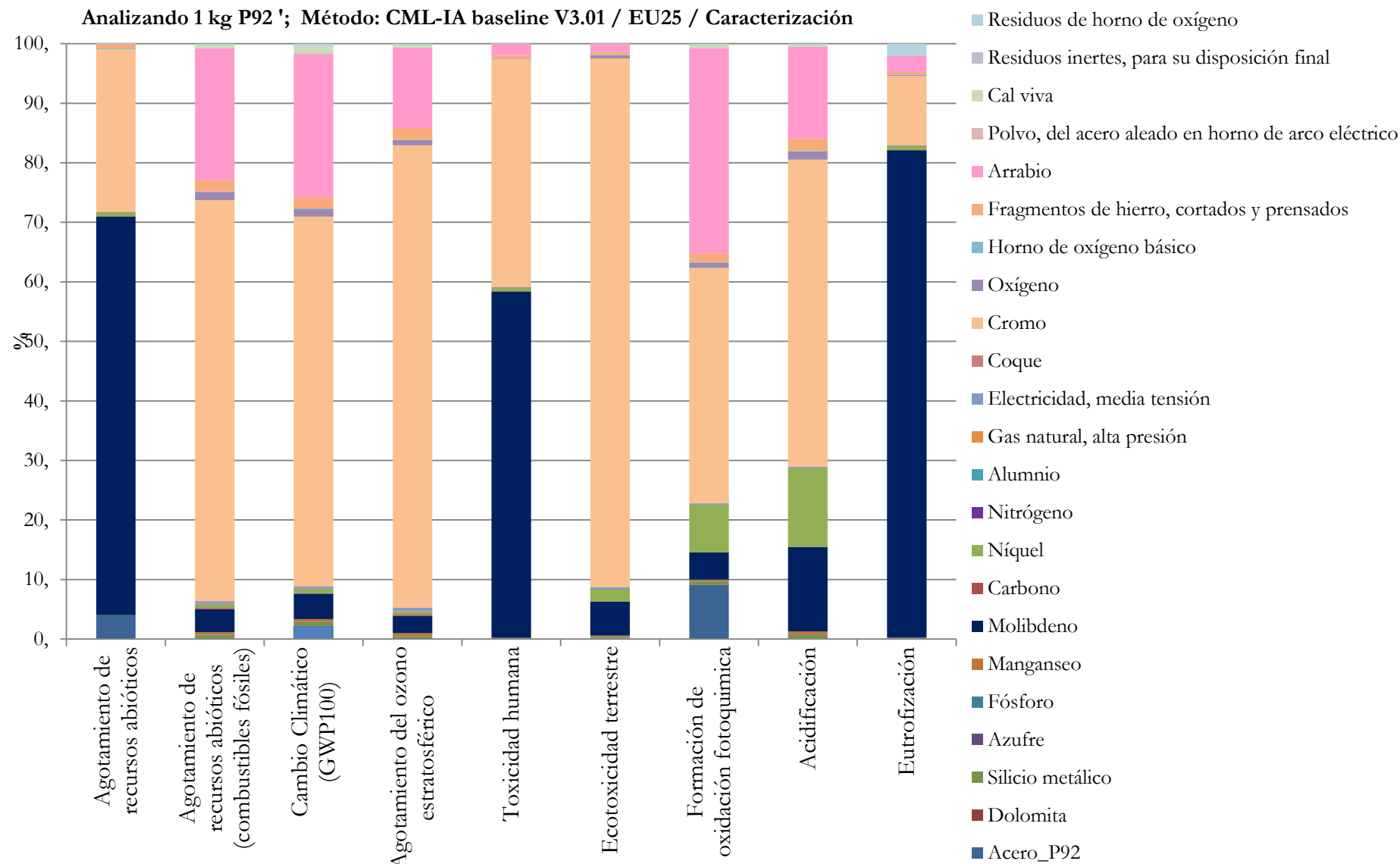


Figura 58. Caracterización de 1kg de acero P92 formato gráfica.

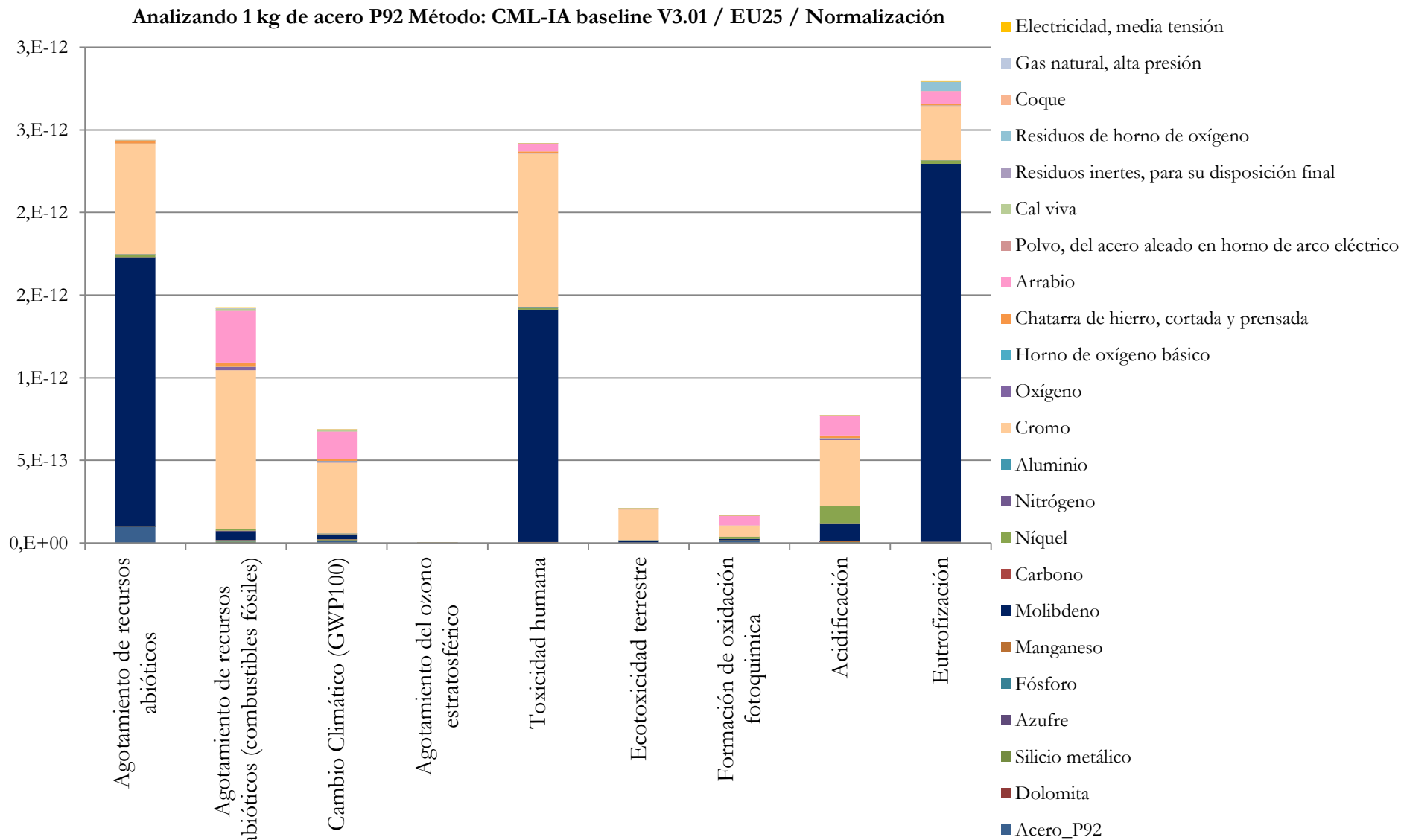


Figura 59. Normalización de 1kg de acero P92 formato gráfica.

En las gráficas, Figura 58 y Figura 59, se presenta la caracterización y la normalización de 1 kg de acero P92. En la caracterización, se aprecia que los aleantes que más influencia tienen sobre las categorías de impacto son el cromo y el molibdeno. El cromo supone grandes aportes, de más del 50% en numerosas categorías como agotamiento abiótico de combustibles fósiles, cambio climático, agotamiento del ozono estratosférico, ecotoxicidad terrestre, acidificación, y en menor proporción, pero también notable, en formación de oxidación fotoquímica y en agotamiento abiótico. De igual manera, el molibdeno presenta contribuciones elevadas a los impactos: eutrofización, toxicidad humana y agotamiento de los recursos abióticos.

Una vez se procede a normalizar el proceso, es decir, a conocer la contribución relativa de los impactos del sistema bajo estudio frente al global planetario, se tiene que las categorías que presentaron una caracterización con mayores contribuciones por molibdeno, son además, las que suponen unos valores superiores de normalización, lo que indica que son las más dañinas en materia de sostenibilidad ambiental. Si bien, categorías con alto contenido en cromo, también presentan valores considerables como puede ser agotamiento abiótico de combustibles fósiles, acidificación o cambio climático.

El arrabio y níquel tienen también su aporte al sistema, aunque en todo caso son valores siempre inferiores a cromo o molibdeno. Cabe destacar el aporte en torno al 10% del Níquel en la acidificación producida. Sin despreciar, por otro lado, el aporte también, del arrabio a la formación de oxidación fotoquímica, al cambio climático y al agotamiento abiótico de combustibles fósiles.

Así pues, se puede concluir que el molibdeno es, globalmente, más afectante sobre los impactos analizados que el cromo ya que en las categorías que presenta un aporte superior, tras la normalización, permanecen las más altas del estudio.

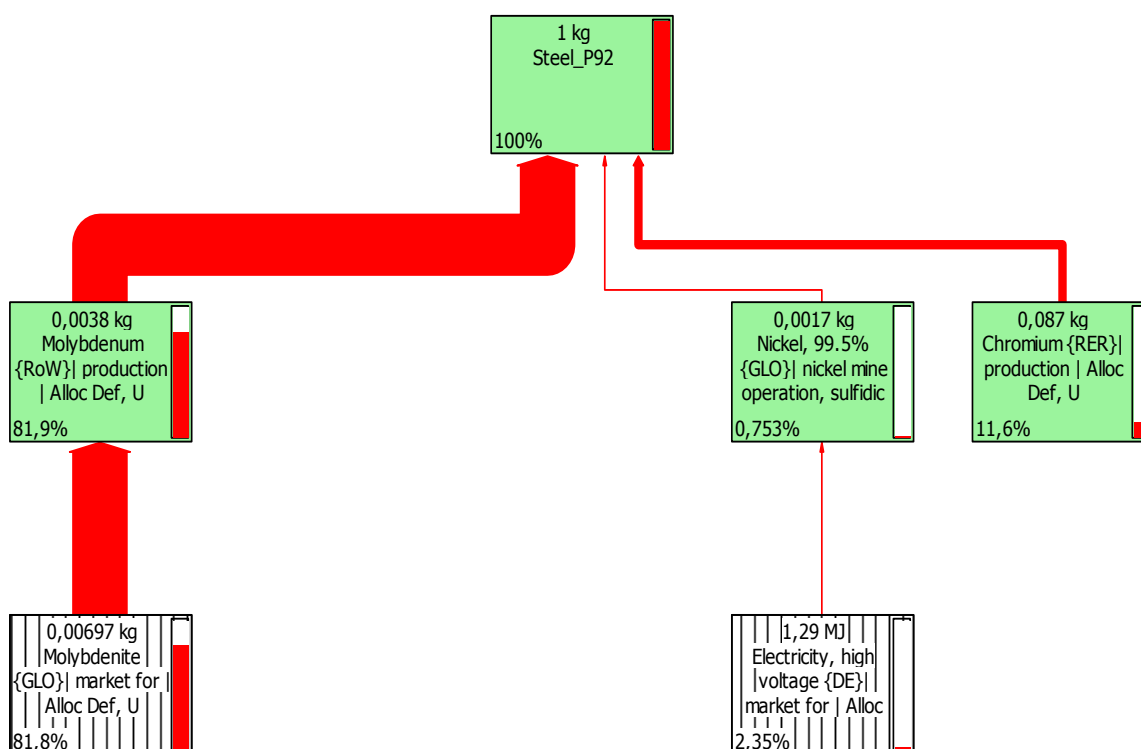


Figura 60. ACV d 1kg de acero P92. Red de la categoría de impacto Eutrofización. No todos los procesos están a la vista. Valor de corte:6,84%

De todas las categorías analizadas, la que presenta daños al medio ambiente con una significancia mayor a las demás es, de nuevo, la eutrofización, y una vez más, es el molibdeno el componente que mayor aporte registra dentro de esta categoría. Seguidamente se encuentra el cromo, del que se puede afirmar que es culpable del 11,6% de la eutrofización de 1kg de acero P92. El níquel aparece con una contribución del 0,753% del impacto final. Es interesante apreciar los subprocesos que aparecen en las redes, en este caso, se puede conocer que la electricidad de alta tensión utilizada para la producción del níquel, que a su vez forma parte del acero P92, tiene un aporte del 2,35%. Así pues, se ve cómo todos los subsistemas considerados en el análisis, tienen sus efectos en la categoría final. Por ello, es importante realizar análisis de ciclo de vida completos, porque de esta forma se puede conocer los impactos que producen subprocesos aguas arriba del producto final, como es el caso anteriormente comentado.

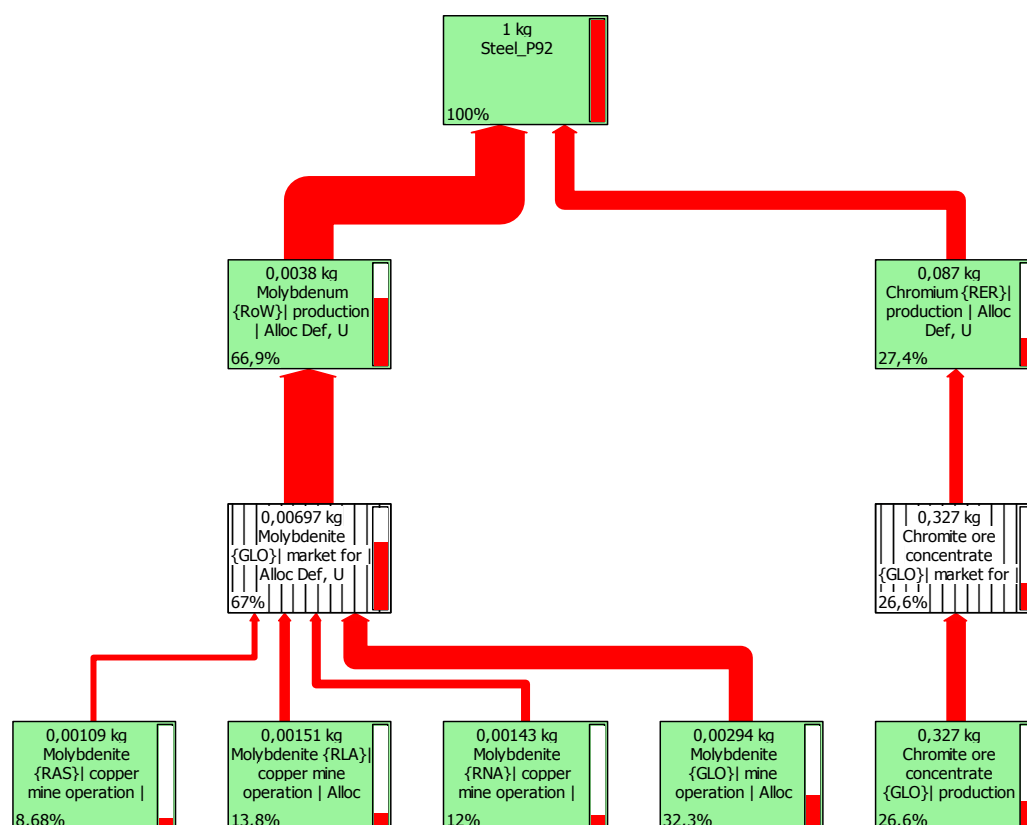


Figura 61. ACV d 1kg de acero P92. Red de la categoría de impacto Agotamiento abiótico. No todos los procesos están a la vista. Valor de corte:4,94%

La caracterización del agotamiento de los recursos abióticos se representa en forma de red en la Figura 61. Tiene un valor de corte de 4,94%, es decir, todo impacto que esté por debajo de esta contribución, no aparece. Se aprecia cómo el molibdeno vuelve a ser el agente más importante y que impacta con mayor fuerza sobre el 100% final, supone un 66,9%. EL 27,4% del aporte es causado por el cromo.

Del mismo modo que en redes detalladas con anterioridad, se ven los subprocesos. Para el molibdeno, se aprecian los procesos de la molibdenita, con sus consecuentes aportaciones al impacto. Y en el caso del cromo se puede ver cómo impacta la cromita.

Estas redes son útiles y muy visuales para ser capaces de seguir la ruta de los impactos y conocer, además, si existe algún subproducto o subproceso que aporte graves contribuciones al propio proceso que se está analizando. Cuando se realiza algún cambio en la composición del material inicial, se modifican estas redes y sus flujos, y sirven, entonces, como una herramienta de sustitución de materiales por otros más respetuosos.

### 6.2.5. ACV comparativo entre los aceros P92, T22, A516 y AISI316. Método CML.

Comparando 1 kg 'Acero\_A516', 1 kg 'Acero\_AISI316', 1 kg 'Acero\_P92' y 1 kg 'Acero\_T22'; Método: CML-IA baseline V3.01 / EU25 / Caracterización

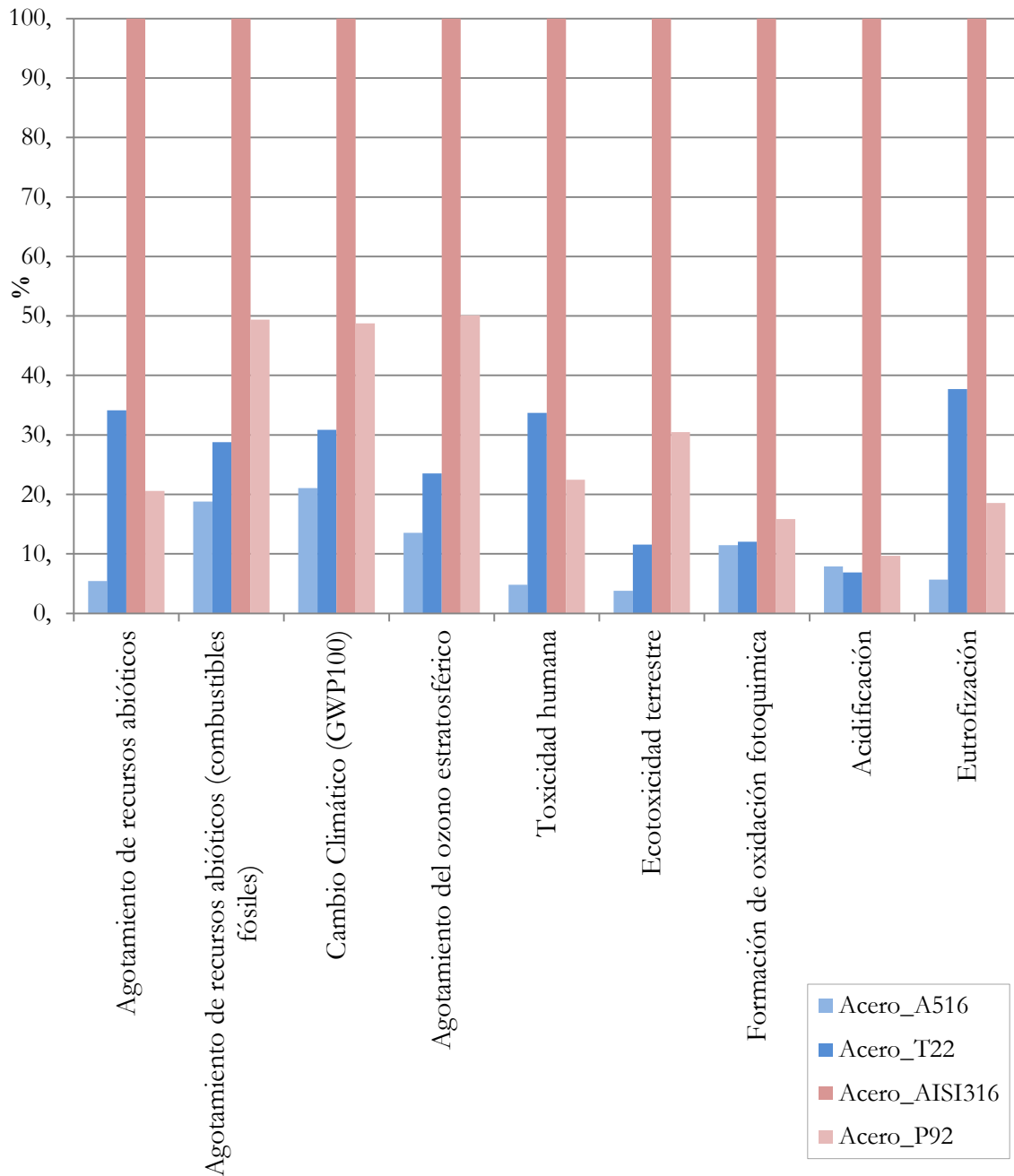


Figura 62. ACV comparativo de los 4 aceros bajo estudio. Caracterización en CML.

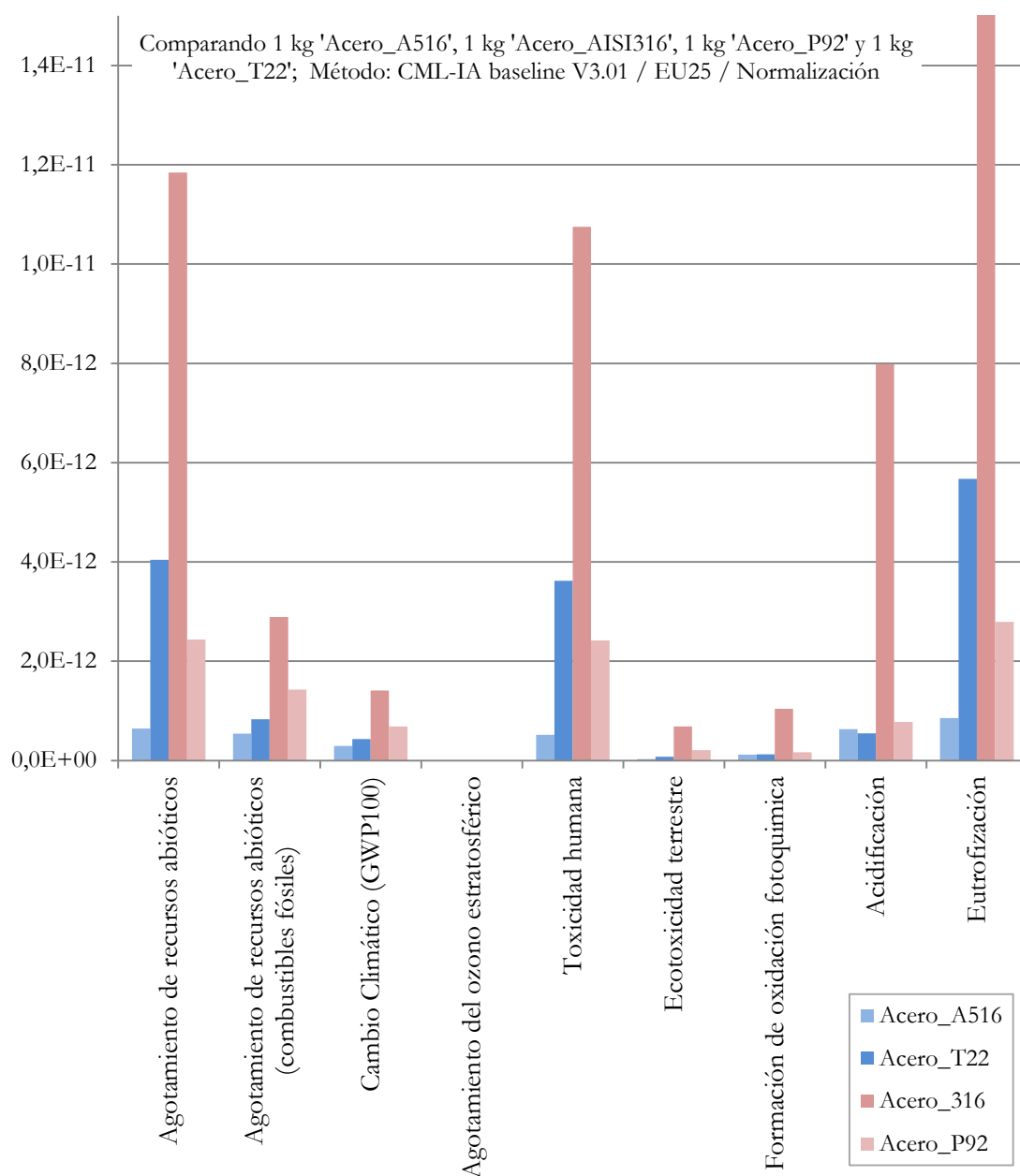


Figura 63. ACV comparativo de los 4 aceros bajo estudio. Normalización en CML.



La Figura 62 y la Figura 63 representan la caracterización y normalización de los cuatro aceros estudiados. En ambas gráficas se pueden observar los cuatro aceros a la vez puesto que se trata de un ACV comparativo. En estas representaciones se pierde el detalle de los componentes que están incluidos en cada una de los totales, es por ello que se han obtenido los procesos unitarios de forma individual. Para conocer qué aportes implica tener más o menos porcentaje en peso de un cierto componente al total del impacto.

En este caso, el objeto de esta representación es otro. Una vez conocidos cuáles son los elementos que suponen las problemáticas medioambientales, se sube aguas arriba para conocer qué aceros son más o menos respetuosos con el medio ambiente, realizando una comparativa entre ellos. Así pues, en estas representaciones se ha marcado en azul los aceros que están destinados a la parte de las centrales que llamaremos aplicaciones frías, que son, en este caso, los tanques de almacenamiento de sales frías. Del mismo modo, aparecen representados en rojo los aceros que formarán parte en las centrales de las llamadas aplicaciones calientes, que son la parte de colectores, el sistema de intercambio y los tanques de almacenamiento de las sales calientes.

Estas dos gráficas sirven para definir los aceros que son más respetuosos y poder tener una idea inicial de cuál sería una selección correcta entre ellos. Posteriormente, en el análisis de las centrales, se pondrán de manifiesto lo que implica no tener 1kg sino toneladas de material. Los resultados de ello se verán más adelante pero por lo pronto se puede hacer una elección.

La comparativa muestra diferentes cuestiones, el AISI 316 es el que peores resultados obtiene en todas las categorías de impacto analizadas, así pues, frente al otro posible candidato a conformar las aplicaciones calientes, se puede decir que en el caso de los aceros para estas aplicaciones, es decir, los aceros inoxidables, será más recomendable el uso de acero P92 que el uso de acero AISI316.

En el caso de las aplicaciones frías se tiene que el acero T22, frente al A516 conlleva impactos superiores en todas las categorías estudiadas a excepción de dos, que son oxidación fotoquímica y acidificación. En el A561 la acidificación es el tercer problema más importante (por detrás de eutrofización y agotamiento de los recursos abióticos) y la oxidación fotoquímica no presenta contribuciones demasiado elevadas

(según Figura 55). En el caso del T22 ni la oxidación fotoquímica ni la acidificación son sustancialmente relevantes puesto que aparecen (según Figura 51) en el orden 6 y 5 respectivamente en el orden de significancia de los impactos. Por todo ello, se puede afirmar que el acero A516 es más respetuoso, globalmente, con el medio ambiente que el T22.

Se pudo apreciar en la Figura 47 cómo el acero AISI316 dispara las categorías eutrofización, agotamiento de los recursos abióticos y toxicidad humana en una proporción muy superior a su homólogo en aplicaciones calientes, pero también respecto a los aceros que estarán colocados en aplicaciones frías.

El acero A516 resulta el más adecuado, de los cuatro estudiados, si lo que se pretende es reducir la problemática medioambiental.

Al igual que en los análisis individuales, las categorías más afectadas para los aceros bajo estudio permanecen en la comparativa. La eutrofización es el problema medioambiental más importante de todos los aceros estudiados, en todos ellos representa la categoría más elevada.

Si bien la acidificación no es un gran impacto en el caso de A516, T22 y P92, se aprecia cómo sí lo es para el A316, lo que lleva a obtener conclusiones sobre sus aleantes. Sucede lo mismo en el caso de toxicidad humana y en de agotamiento de los recursos abióticos.

El acero AISI 316 tiene una composición en peso de un 0,3% en peso de cobre y un 0,3% en níquel y se produce una acidificación debida en un, aproximadamente, 80% al Níquel. Mientras que la contribución del cobre a esta categoría no es tan elevada, en torno al 33%.

Así pues, el níquel produce peores resultados en la categoría de acidificación que el cobre.

En todo el estudio pormenorizado de componentes que se ha realizado en puntos previos, se ha visto cómo el Mo, Ni y Cr son los elementos más repetidos en cuanto a afección al medio ambiente. Una pequeña composición en peso de uno de estos componentes suponía grandes aportes a categorías de impacto que eran, además, las que, tras la normalización, resultaban con peor comportamiento.

%	Mo	Ni	Cr
<b>316</b>	2,14	10,55	16,88
<b>P92</b>	0,38	0,17	8,7
<b>T22</b>	0,9	0	2
<b>A516</b>	0,08	0,33	0,3

Tabla 53. Porcentaje de la composición en peso de los principales agentes impactantes sobre los aceros.

Se introduce la Tabla 53 para tener la referencia de los porcentajes en peso de los aceros.

Las categorías eutrofización, agotamiento abiótico y toxicidad humana, en todos los aceros, se aprecia que la contribución superior es debida al molibdeno. Así pues, se comprueba, por ello, que si el acero 316 tiene el mayor porcentaje en peso de molibdeno, será el que mayores impactos produzca en estas categorías, y así es.

La categoría acidificación, está muy influenciada por el contenido en níquel de los aceros, por ello, de nuevo, si el acero 316 tiene el mayor contenido en este aleante, será el que presente superiores impactos en esta categoría, y así es.

Para el caso del cromo, se aprecia que en las categorías de impacto agotamiento de los recursos abióticos (combustibles fósiles), cambio climático, agotamiento del ozono estratosférico y ecotoxicidad terrestre, tiene altos aportes. Por ello, al ser el acero 316 el que presenta un porcentaje en peso superior, aparecen resultados superiores en estos impactos.

El acero con mayor contenido en aleantes más contribuyentes a los impactos, es el que peores comportamientos medioambientales presenta, es el caso del acero 316.

### 6.2.6. Sal solar binaria. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados.

Del mismo modo que se procedió con los aceros bajo estudio, se ha procedido con los fluidos de almacenamiento térmico. Se irán mostrando los resultados en forma de tablas, con sus valores numéricos y se graficarán los mismos para conocer sus valores relativos así como la contribución de sus elementos sobre el impacto final.

Para la sal solar binaria los resultados se encuentran en la Tabla 54, en ella se aprecian los valores que 1kg de sal solar binaria aporta a cada categoría de impacto.

En la Tabla 55, se ha procedido a la normalización de los mismos, con el objetivo de toda normalización, conocer, dentro de todas las categorías estudiadas, cuál es aquella que en sí misma supone una problemática superior, en cuanto a daños en el medio ambiente se refiere.

Categoría de impacto	Unidad	Total
Agotamiento de recursos abióticos	kg Sb eq	1,83E-05
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	MJ	28,272006
Cambio Climático (GWP100)	kg CO2 eq	4,0068605
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC-11 eq	1,04E-07
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	0,94681959
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,00117808
Formación de oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	0,00052763
Acidificación	kg SO2 eq	0,01672546
Eutrofización	kg PO4--- eq	0,0085963

Tabla 54. Caracterización del 1kg de sal solar binaria.

Categoría de impacto	Total
Agotamiento de recursos abióticos	2,16E-13
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	8,99E-13
Cambio Climático (GWP100)	7,97E-13
Agotamiento del ozono estratosférico	1,16E-15
Toxicidad humana	1,22E-13
Ecotoxicidad terrestre	2,43E-14
Formación de oxidación fotoquímica	6,23E-14
Acidificación	5,94E-13
Eutrofización	6,52E-13

Tabla 55. Normalización de 1kg de sal solar binaria.

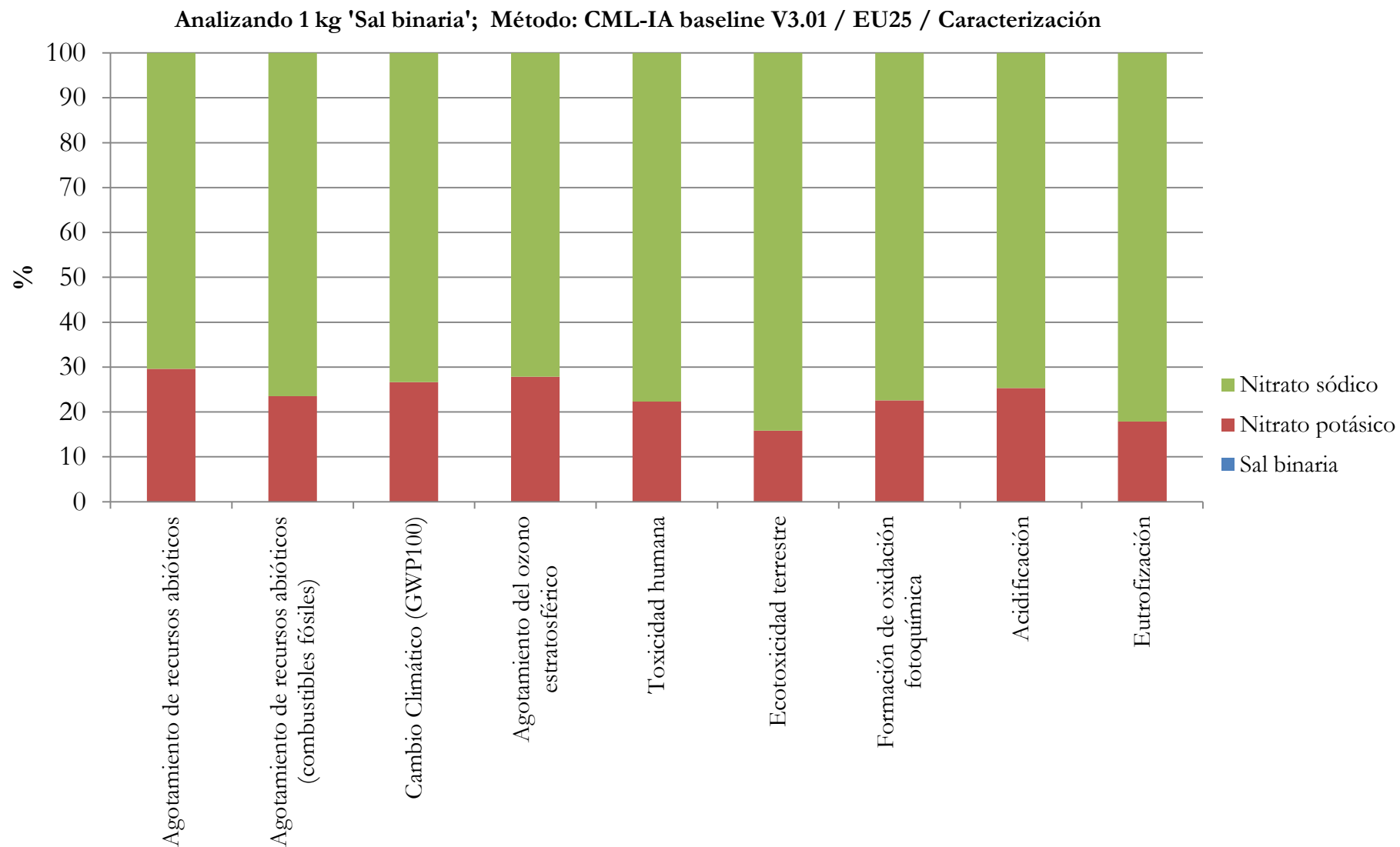


Figura 64. Caracterización de 1kg de acero sal solar binaria, formato gráfica.

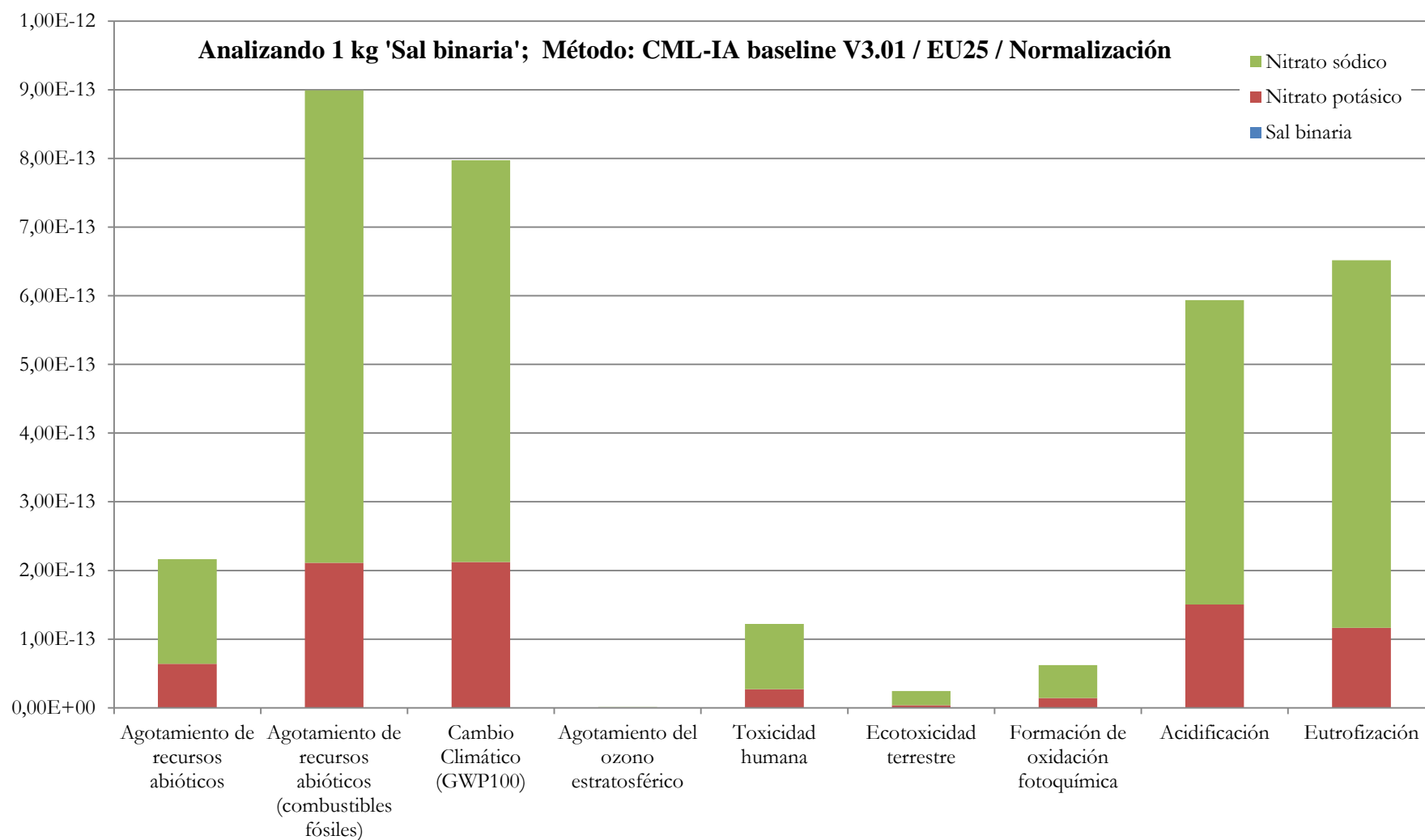


Figura 65. Normalización de 1kg de sal solar binaria, formato gráfica.

La sal solar binaria se caracteriza, como su nombre indica, por estar formada por dos componentes, tal y como se ha descrito en capítulos precedentes. Se trata del nitrato potásico, 40%, y del nitrato sódico, 60%. Para conocer los efectos que produce la sal en sí misma y analizar las contribuciones relativas a sus dos componentes, se caracterizan los impactos.

La caracterización de la sal solar binaria se ha representado en la Figura 64, donde se puede apreciar que tener una composición del 40% en peso de nitrato potásico, no supone que el compuesto en cuestión contribuya a los impactos con esa misma proporción. De hecho, en todos los analizados se queda por debajo de la línea del 30%.

Del mismo modo, se aprecia como las aportaciones mayores a las categorías de impacto son debidas al nitrato sódico. Destacan las categorías ecotoxicidad terrestre, formación de oxidación fotoquímica y toxicidad humana, en las cuales en torno al 80% del impacto que se produce es debido al nitrato sódico.

La normalización de la sal solar binaria aparece expresada en forma de gráfica en Figura 65. Tal cual se viene apreciando en cualquier gráfico de normalización, se aprecia, en este, las categorías de impacto que suponen un deterioro del medio ambiente en mayor medida. En este caso se tratan de las categorías agotamiento abiótico (combustibles fósiles) y la categoría de cambio climático. Sin despreciar la acidificación y la eutrofización. En todo momento se observa la superioridad del nitrato sódico en lo que a contribución a los impactos se refiere. Destacan el agotamiento del ozono estratosférico y la ecotoxicidad terrestre por presentar los niveles menos perjudiciales.

Es decir, la sal solar binaria presenta una mayor problemática medioambiental en agotamiento abiótico (combustibles fósiles) y en cambio climático, siendo su principal agente el nitrato sódico.

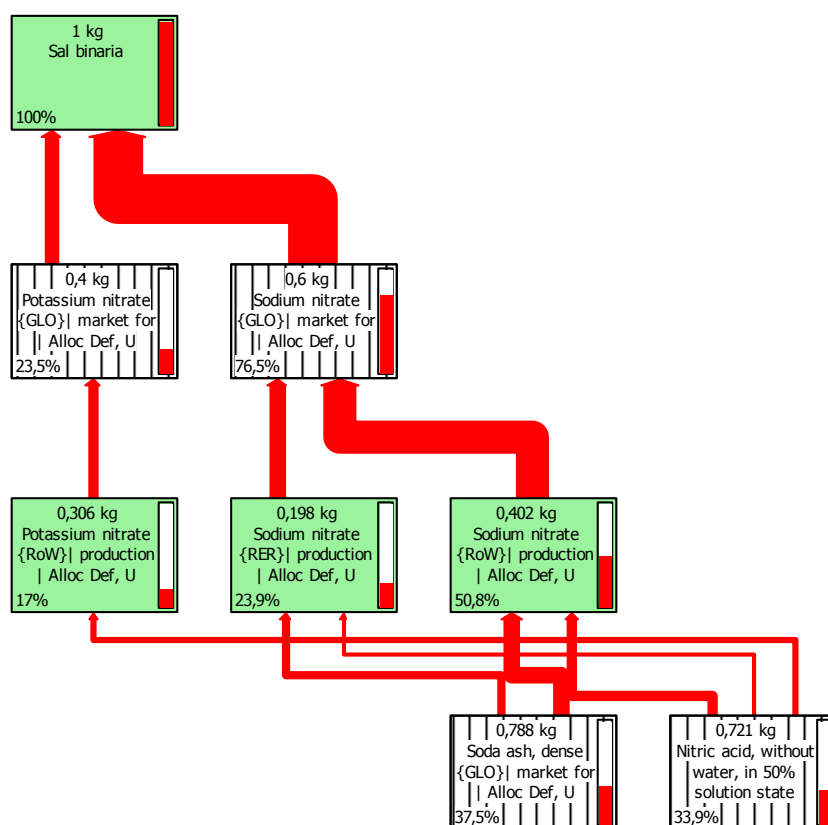


Figura 66. ACV de 1kg de sal solar binaria. Red de la categoría de impacto Agotamiento recursos abióticos (combustibles fósiles). No todos los procesos están a la vista. Valor de corte: 16,6%

En la normalización de 1kg de sal solar binaria se ha comprobado cómo la categoría más influyente es agotamiento de los recursos abióticos (combustibles fósiles), es por ello que se representa su red de caracterización. Ello se puede ver en la Figura 66.

Se observa cómo el 76,5% del impacto es causado por el nitrato sódico y el 23,5% por el nitrato potásico. Es decir, en los 28,27 MJ de agotamiento de combustibles fósiles, 21,63 MJ son causa directa del nitrato sódico y 6,64 MJ del nitrato potásico.

Se aprecian los flujos de contribución al impacto. Apreciándose subsistemas. La producción de nitrato potásico supone una parte del, finalmente, nitrato potásico en el mercado. Al igual que se puede comprobar cómo en el modelo se ha tomado un sódico genérico; formado por un promedio de nitratos potásicos producidos en el mundo, siendo el impacto menor el nitrato potásico que se produce en Europa (RER, conjunto de la región europea por sus siglas en inglés) que en el resto del mundo (RoW, por sus siglas en inglés). Una red permite apreciar todo este tipo de detalles.



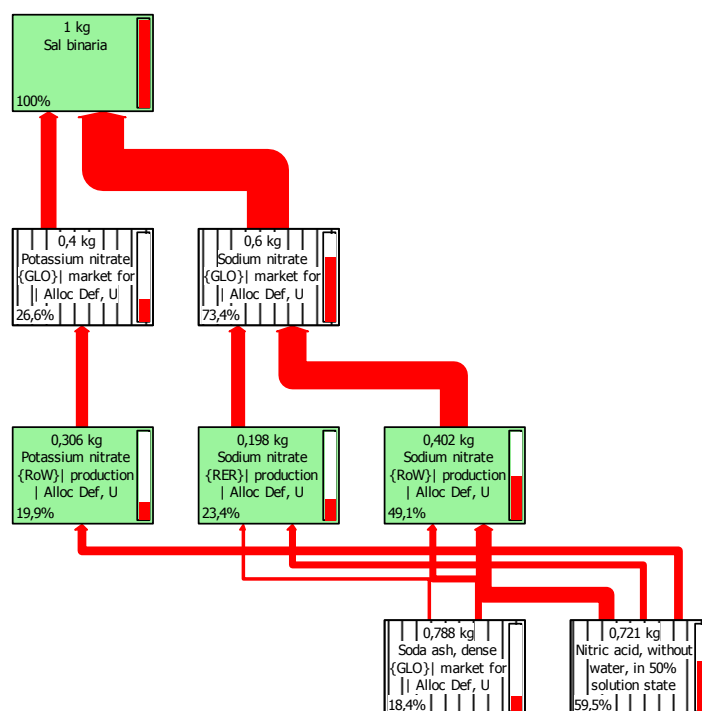


Figura 67. ACV de 1kg de sal solar binaria. Red de la categoría de impacto Cambio Climático. No todos los procesos están a la vista. Valor de corte:18%

La segunda categoría más impactante para la sal solar binaria es el cambio climático. En la Figura 67 se representa la red de caracterización de la misma. Se obtiene para un valor de corte del 18%, es decir, todos los procesos cuya contribución sea inferior al valor de corte, no aparecen representados en la red. Con la red se conoce que un 73,4% del cambio climático producido por la sal solar binaria es causa del nitrato sódico, así como un 26,6% del nitrato potásico.

Se pueden apreciar en dicha red las contribuciones de los subprocesos que conforman los dos procesos de la sal binaria. Así pues, en el caso del nitrato sódico, el ácido nítrico sin agua, en una solución al 50%, aparece como un agente que forma parte del impacto del mismo. De este mismo modo aparece la ceniza usada en el proceso de obtención de este compuesto.

### 6.2.7. Sal solar Hitec. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados.

Tal y como se ha ido procediendo con todos los materiales caracterizados hasta el momento, se realiza, a continuación para la sal solar Hitec. Las tablas Tabla 56 y Tabla 57, representan los resultados obtenidos en la caracterización y normalización, respectivamente, de 1kg de sal solar Hitec.

Categoría de impacto	Unidad	Total
Agotamiento de recursos abióticos	kg Sb eq	1,49E-05
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	MJ	28,18709
Cambio Climático (GWP100)	kg CO2 eq	2,9141476
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC-11 eq	2,75E-07
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	0,77783552
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,00136373
Formación de oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	0,00052233
Acidificación	kg SO2 eq	0,01519623
Eutrofización	kg PO4--- eq	0,00501582

Tabla 56. Caracterización del 1kg de sal solar Hitec.

Categoría de impacto	Total
Agotamiento de recursos abióticos	1,75E-13
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	8,96E-13
Cambio Climático (GWP100)	5,80E-13
Agotamiento del ozono estratosférico	3,08E-15
Toxicidad humana	1,00E-13
Ecotoxicidad terrestre	2,81E-14
Formación de oxidación fotoquímica	6,16E-14
Acidificación	5,39E-13
Eutrofización	3,80E-13

Tabla 57. Normalización de 1kg de sal solar Hitec.

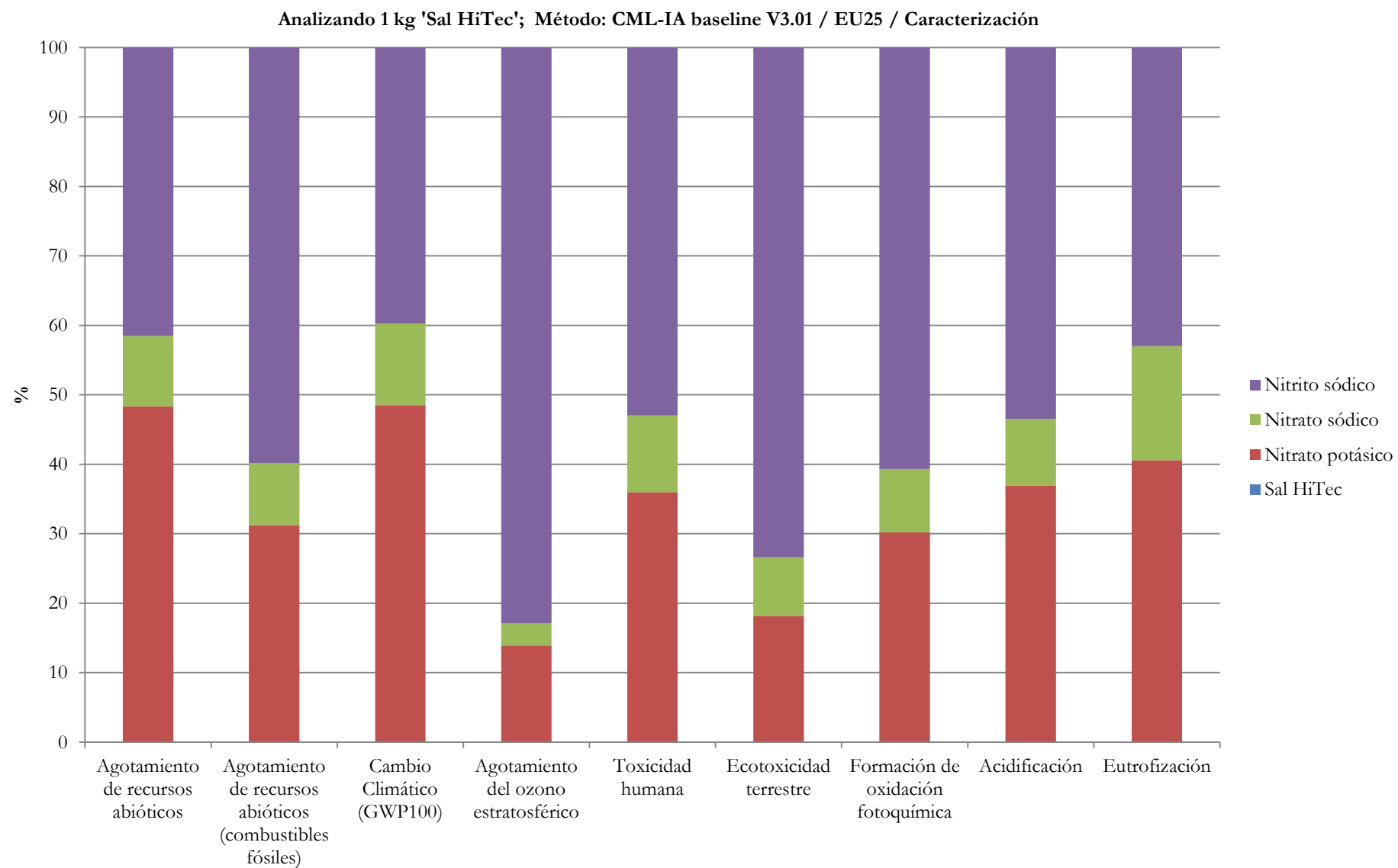


Figura 68. Caracterización de 1kg de sal solar Hitec, formato gráfica.

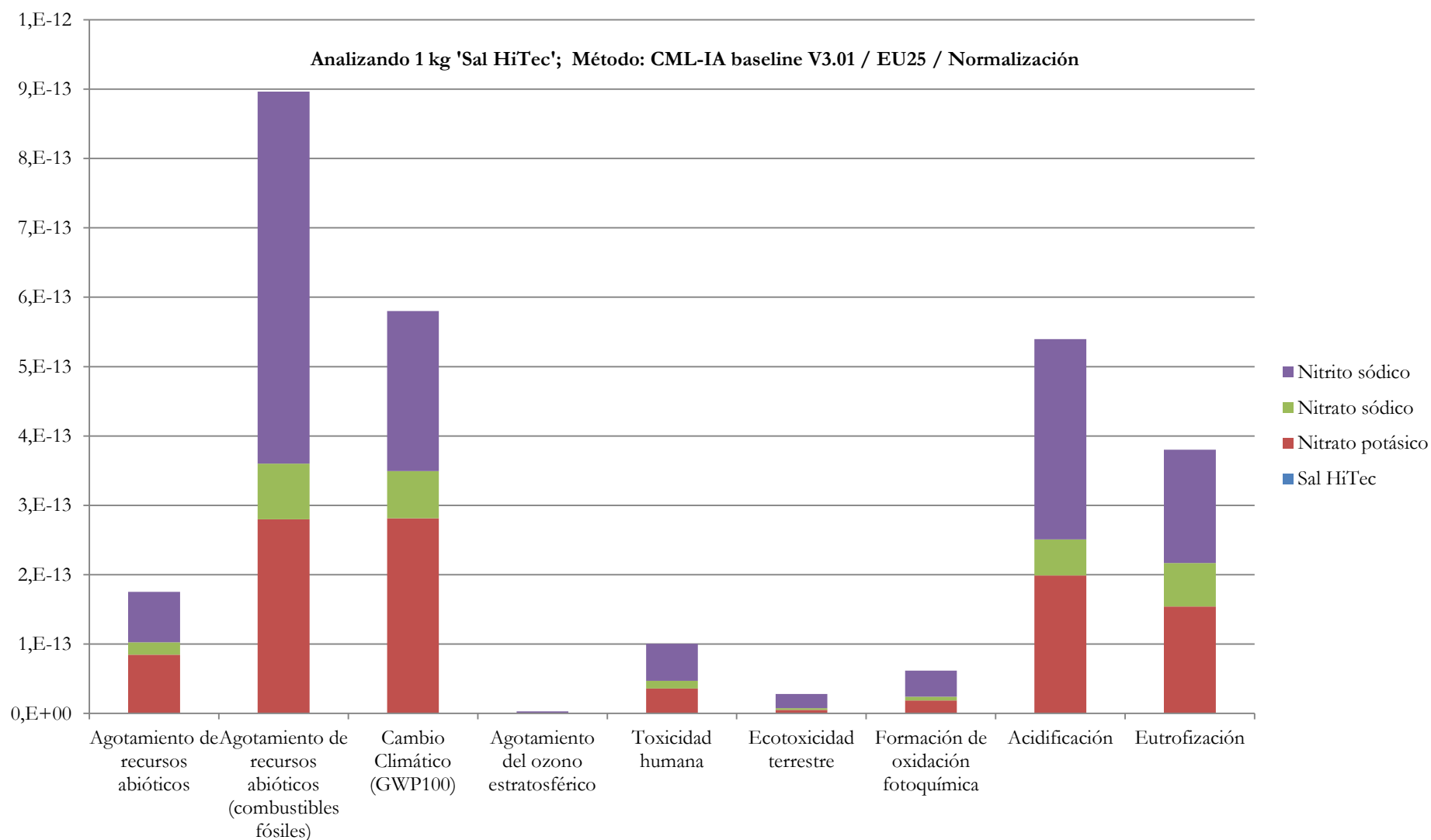


Figura 69. Normalización de 1kg de sal solar Hitec, formato gráfica

La caracterización y normalización de la sal solar Hitec arroja resultados que se deben analizar. Se ha representado la caracterización de 1kg de sal solar Hitec en la Figura 68, lo más significativo que se puede apreciar en ella son los sectores que componen cada categoría de impacto. Son los tres componentes de la sal solar Hitec. En todos los impactos se observa que el nitrato sódico tiene un aporte inferior, muy relacionado con el bajo porcentaje de éste en la composición en peso de la sal, el 7%. Otro aspecto significativo de la caracterización es aquel en el que se puede contemplar, por ejemplo, con el caso del nitrato sódico, es cómo en impactos como la eutrofización, este mismo componente tiene otros inferiores, por ejemplo el caso del agotamiento del ozono estratosférico. Es decir, la influencia de un material en una categoría de impacto difiere en función de lo que la propia categoría considere. Es, al fin y al cabo, una afirmación trivial, aunque no debe ser obviada en ningún caso.

La Figura 69 es la normalización de 1kg de sal solar Hitec. En la normalización se puede apreciar los impactos que suponen consecuencias potencialmente más perjudiciales respecto de los otros considerados. En este caso, el agotamiento de los combustibles recursos abióticos (combustibles fósiles) es la categoría más acuciante seguida por el cambio climático. Destaca por su aporte inferior el agotamiento del ozono estratosférico y la ecotoxicidad terrestre.

En la sal solar binaria se apreciaba cómo el nitrato sódico era, en todo momento, el elemento que mayores impactos suponía, frente al nitrato potásico. En el caso de la sal solar Hitec el nitrato potásico y el nitrito sódico son aquellos que presentan un aporte superior, viendo cómo un descenso en la concentración de nitrato sódico, desciende su contribución a los impactos.

En la comparativa que se presenta a continuación se podrá apreciar si ello ha influido para bien o para mal en el resultado final.

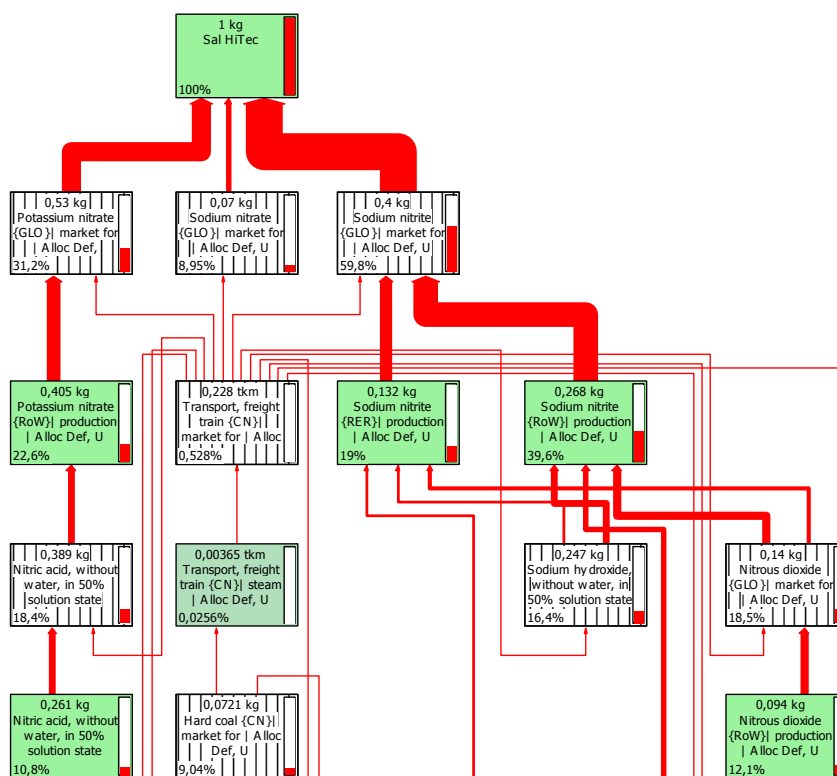


Figura 70. ACV de 1kg de sal solar Hitec. Red de la categoría de impacto Agotamiento recursos abióticos (combustibles fósiles). No todos los procesos están a la vista. Valor de corte:8,9%

Tal y como se ha comentado a lo largo de todo el desarrollo del presente capítulo, las redes muestran los detalles de los elementos y procesos que conforman el producto final. En ellas, además, se observa la implicación de cada ítem sobre el análisis que se está llevando a cabo.

En la Figura 70 se tiene la red de la categoría que presenta unos resultados menos favorables para el medio ambiente de la sal solar Hitec. Es el agotamiento abiótico (combustibles fósiles).

Se aprecian las contribuciones de los tres elementos conformantes de la sal ( $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$  y  $\text{NaNO}_2$ ) y los subelementos que a su vez los conforman, en esta red se ven procesos que no habían aparecido en otras como puede ser el transporte de las mercancías en tren.

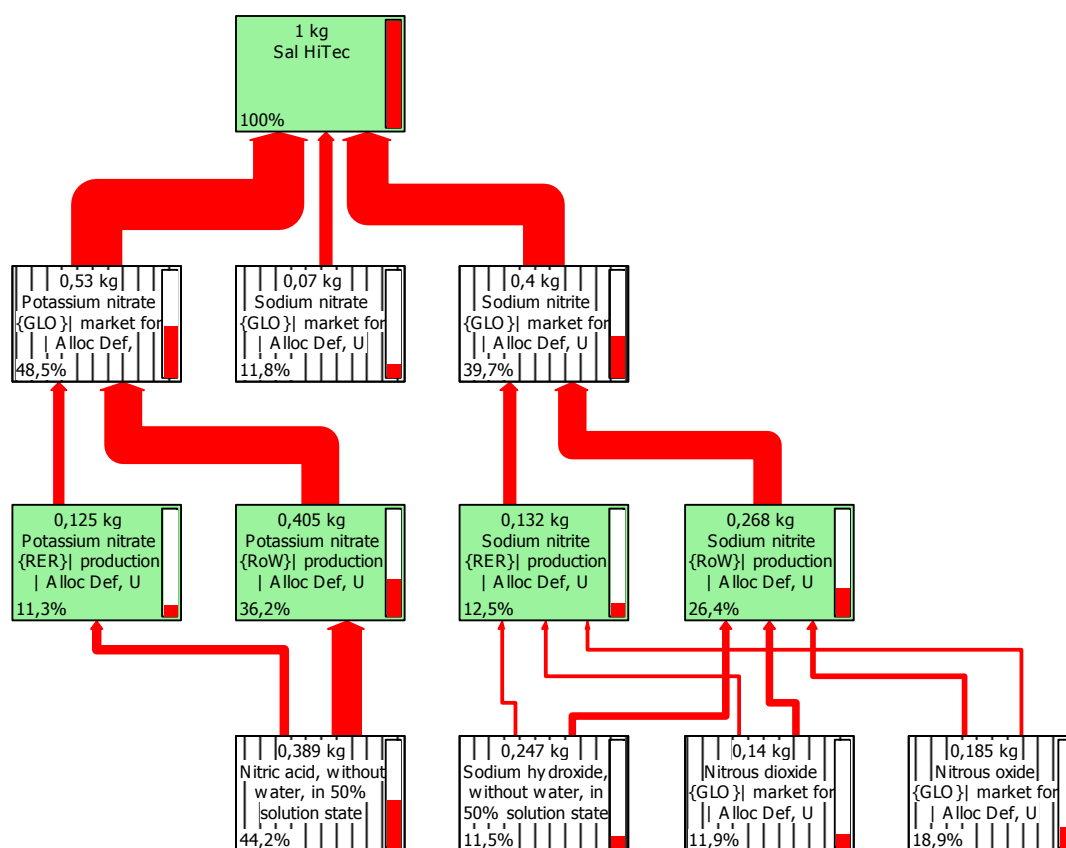


Figura 71. ACV de 1kg de sal solar Hitec. Red de la categoría de impacto Cambio Climático. No todos los procesos están a la vista. Valor de corte:9,8%

Del mismo modo, se presenta la red de la segunda categoría más impactante. El valor de corte es 9,8% y se trata de la caracterización de 1kg de sal solar Hitec para los kg de CO<sub>2</sub> eq, es decir, el Cambio Climático.

El cambio climático que potencialmente produce 1kg de sal solar Hitec, es causado en un 48,5% por el nitrato potásico, un 11,8% por el nitrato sódico y un 39,7% por el nitrito sódico. A su vez, cada uno de ellos tiene, aguas abajo, los subprocesos que los conforman y cómo contribuyen al impacto final. Cabe destacar que no todos los procesos están a la vista, tan solo aquellos que generan un impacto superior al valor de corte.

### 6.2.8. Aceite térmico Therminol. ACV de 1kg de material. Evaluación de Impacto y análisis de resultados.

En las tablas Tabla 58 y Tabla 59, se encuentran recogidos los valores de los impactos realizados mediante CML para 1kg de aceite térmico Therminol. Inicialmente se caracterizó, y posteriormente se normalizó, a través de los valores de normalización adoptados, con el objetivo de obtener conclusiones comparativas entre las diferentes categorías.

Categoría de impacto	Unidad	Total
Agotamiento de recursos abióticos	kg Sb eq	6,02E-05
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	MJ	171,66413
Cambio Climático (GWP100)	kg CO2 eq	10,349689
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC-11 eq	1,78E-06
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	56,010517
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	0,00814478
Formación de oxidación fotoquímica	kg C2H4 eq	0,0069965
Acidificación	kg SO2 eq	0,17089745
Eutrofización	kg PO4--- eq	0,03662807

Tabla 58. Caracterización del 1kg de aceite térmico Therminol.

Categoría de impacto	Total
Agotamiento de recursos abióticos	7,10E-13
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	5,46E-12
Cambio Climático (GWP100)	2,06E-12
Agotamiento del ozono estratosférico	2,00E-14
Toxicidad humana	7,23E-12
Ecotoxicidad terrestre	1,68E-13
Formación de oxidación fotoquímica	8,26E-13
Acidificación	6,07E-12
Eutrofización	2,78E-12

Tabla 59. Normalización de 1kg de aceite térmico Therminol.



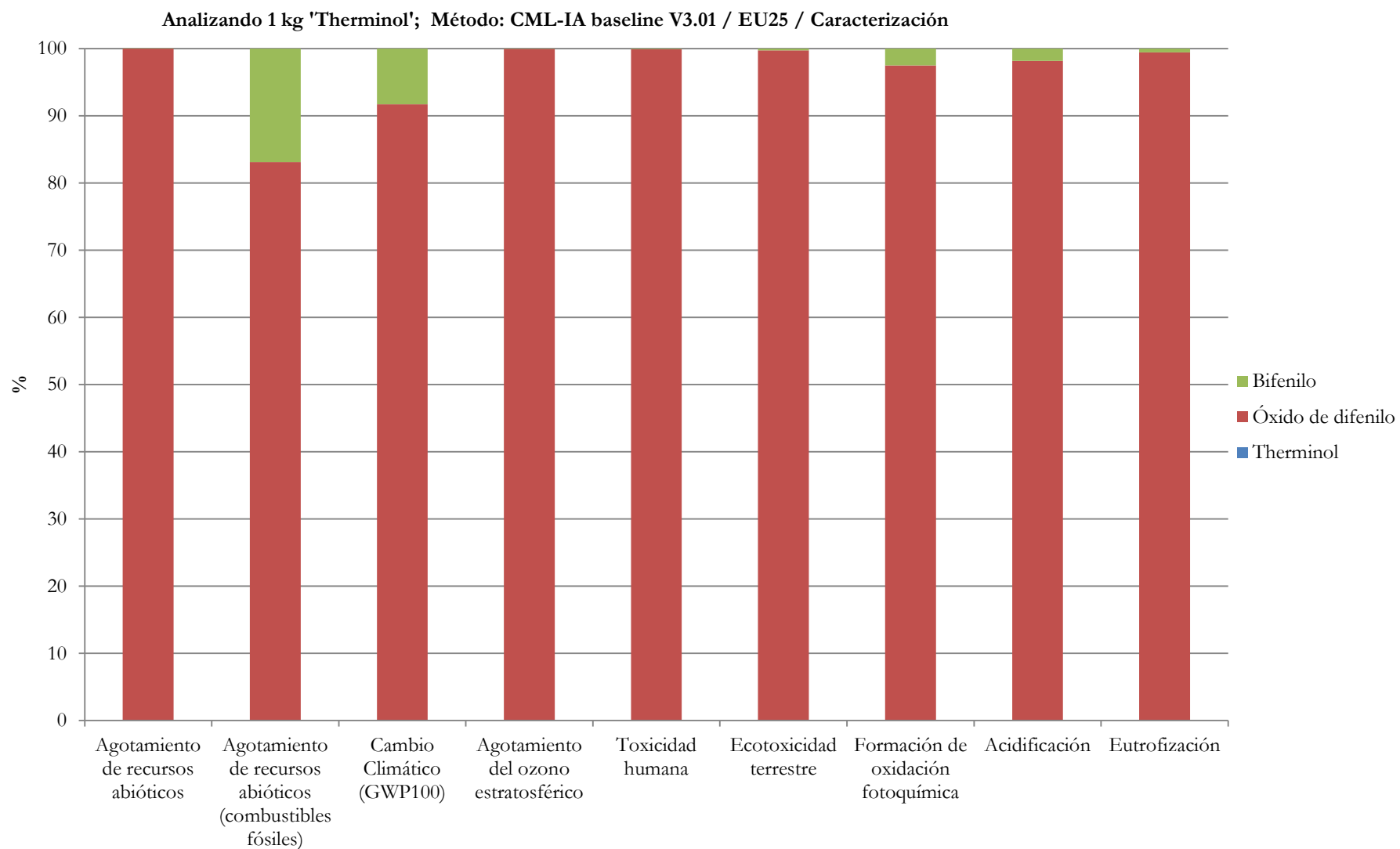


Figura 72. Caracterización de 1kg de aceite térmico Therminol, formato gráfica.

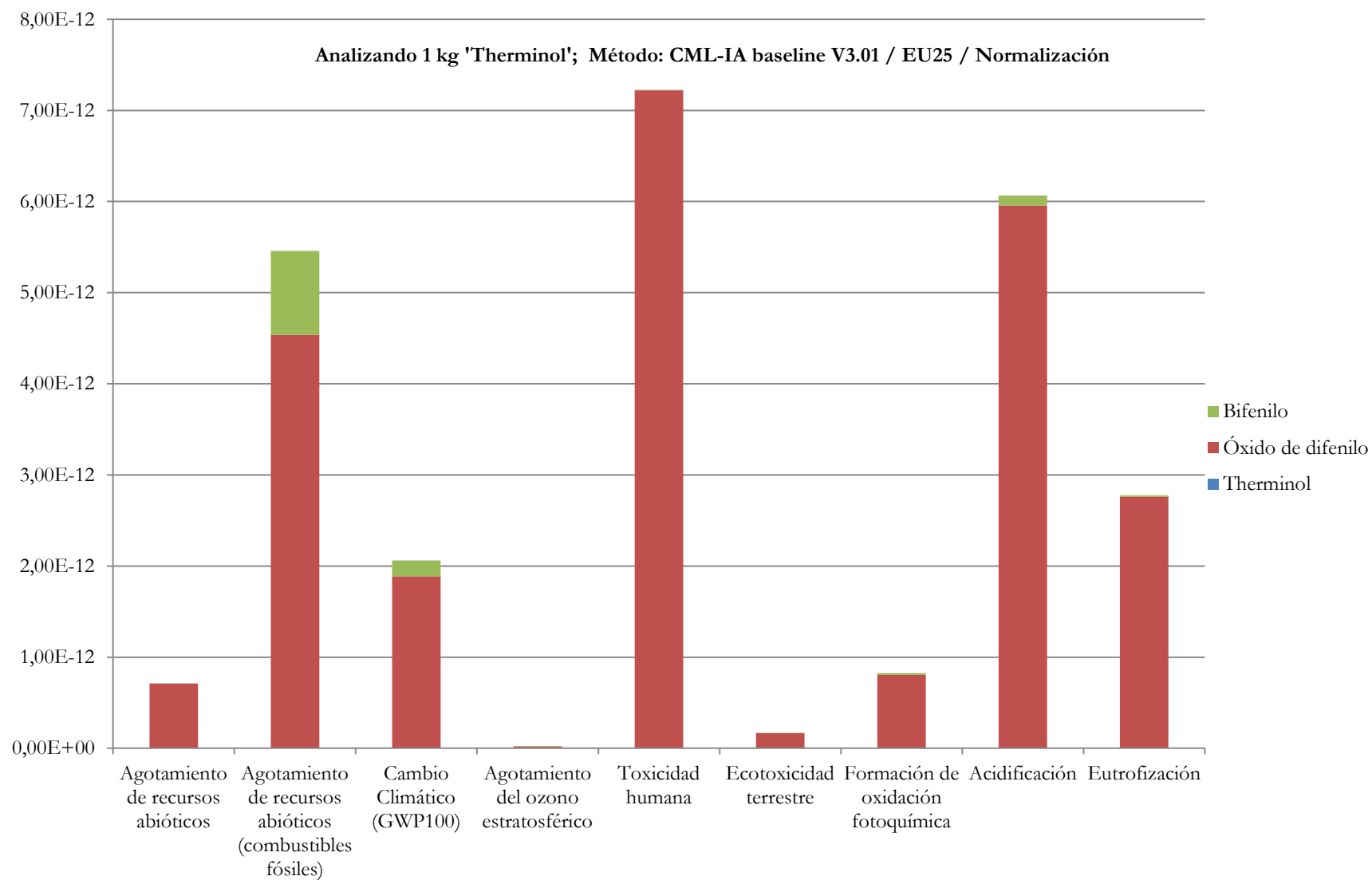


Figura 73. Normalización de 1kg de aceite térmico Therminol, formato gráfica.

El procedimiento seguido para cada uno de los materiales estudiados ha sido el mismo. Es el único modo de poder realizar comparativas que resulten representativas. Así pues, en la Figura 72 se localiza la caracterización de 1kg de aceite térmico Therminol. Este aceite está compuesto por un 73,5% en peso de óxido de difenilo y de un 26,5% en peso de bifenilo. Se recuerda la composición en peso para poder llegar a conclusiones objetivas.

Se puede apreciar cómo el 26,5% en peso de bifenilo, apenas tiene representación en la mayoría de los impactos considerados, siendo la práctica totalidad de la causa de los impactos la debida al 73,5% del óxido de difenilo. Tan solo se observa un aporte más significativo en las categorías agotamiento abiótico (combustibles fósiles) y cambio climático, y en menor medida a la formación de oxidación fotoquímica y a la acidificación. Para el resto, la contribución del bifenilo (en color verde) es prácticamente despreciable frente al óxido de difenilo (representado en color rojo).

La Figura 73 representa la normalización de los impactos, en esta figura se comprueba qué categorías tienen un valor relativo más afectante sobre el medio ambiente. Así pues, la toxicidad humana se ensalza como el principal problema del Therminol, seguida de la acidificación y el agotamiento de los recursos abióticos (combustibles fósiles).

El agotamiento del ozono estratosférico es la categoría con un impacto medioambiental menos acuciado siendo destacable que en la caracterización de la misma apenas se diferencia la contribución del bifenilo y cuando se realiza la normalización, se puede observar que el bifenilo es el principal elemento. Esto es debido a que aunque en el impacto global un elemento afecte de un modo, cuando se estudia su relación con respecto al global, puede apreciarse cómo un elemento supone peores consecuencias que el otro, es este el caso, por ejemplo, del bifenilo, en la categoría agotamiento del ozono estratosférico.

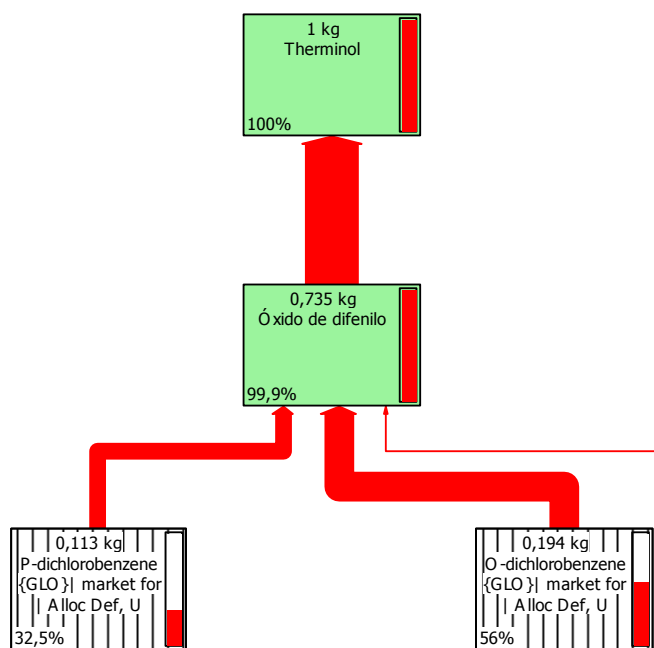


Figura 74. ACV de 1kg de aceite térmico Therminol. Red de la categoría de impacto Toxicidad Humana. No todos los procesos están a la vista. Valor de corte: 3,9%

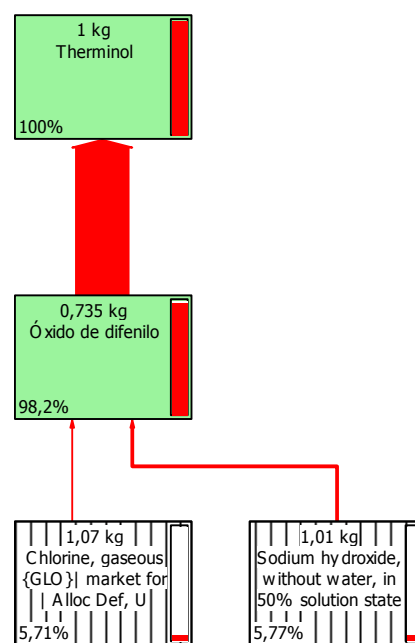


Figura 75. ACV de 1kg de aceite térmico Therminol. Red de la categoría de impacto Acidificación. No todos los procesos están a la vista. Valor de corte: 4,49%

La toxicidad humana ha resultado la principal afección con impacto negativo sobre el medio ambiente del aceite térmico Therminol. En la Figura 74 se ha obtenido la red de esta categoría. Se obtuvo un resultado de 56,010517 kg 1,4-DB eq (Tabla 58), de ellos, el 99,9% son causa directa del óxido de difenilo. Es decir, el aporte del bifenilo al más conflictivo de los impactos del aceite es menor que 0,056 kg 1,4-DB eq.

Sucede algo parecido para la segunda categoría de impacto, se trata de la acidificación, y en su red de caracterización (Figura 75), se aprecia que el flujo hacia el 100% del impacto de Therminol, proviene en un 98,2% del óxido de difenilo. Es decir, de los 0,17089745 kg de SO<sub>2</sub> eq que están asociados a 1kg de Therminol, tan solo 3,07 E-03 son debidos al bifenilo.

### **6.2.9. ACV comparativo entre sal solar binaria, sal solar Hitec y aceite térmico Therminol. Método CML.**

Después de analizar los dos tipos de sales, se aprecia que en ambas, las categorías más perjudiciales son: agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles) y cambio climático, seguidas de acidificación y eutrofización.

Además de ello, la sal Hitec presenta un mejor comportamiento medioambiental en todas las categorías, comparada con la sal solar binaria.

Por ello, de forma unitaria, se puede concluir que la sal solar Hitec sería la candidata en una selección de materiales entre las dos, por su mejora del comportamiento medioambiental respecto de la binaria.

Para el caso del aceite térmico, se aprecia cómo las categorías en las que resulta más perjudicado no coinciden con la de las sales solares. Las categorías más perjudiciales para el aceite son: toxicidad humana, acidificación, agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles) y cambio climático.

De las aportaciones más significativas que se han apreciado con respecto al aceite es que un porcentaje importante en composición relativamente importante (26,5% de bifenilo), no tiene grandes contribuciones a los impactos, la mayoría de ellos viene derivados del óxido de difenilo.

En la comparativa se aprecia que el aceite térmico obtiene resultados superiores a las sales en todas las categorías de impacto. Esto se puede comprobar analizando las gráficas de caracterización y normalización del ACV comparativo de los tres elementos, que se detallan en las Figura 76 (caracterización) y Figura 77 (normalización). De se puede llegar a la conclusión que si el aceite es más perjudicial en todas las categorías, entonces cabría esperar que la opción de plantas directas será más favorable para el cuidado del medio ambiente. De forma unitaria así resulta, y se verá más adelante cómo aun introduciendo más variables de una central térmica, los resultados serán mejores en el caso de considerar las sales fundidas fluido de almacenamiento térmico y fluido de transferencia de calor (sistemas directos) que en el caso de aceite térmico como fluido de transferencia de calor y sales para el almacenamiento (sistema indirecto).

En el apartado de elección entre sales, se produce concluir que unitariamente la sal solar Hitec presenta significativas mejoras respecto a las sal solar binaria, de hecho es un caso digno de análisis.

En la sal solar binaria el nitrato sódico (60% composición en peso) representa las mayores contribuciones a todos los impactos. En la sal solar Hitec éste nitrato se reduce al 7%, consiguiendo con esto una reducción global en todas las categorías. Ni siquiera empeorada por el aumento del 40 al 53% de nitrato potásico en su composición y la adición del 40 % de nitrito sódico. Por lo que se puede determinar que la sal solar Hitec es un ejemplo de ecoeficiencia.

Uno de las aplicaciones del ACV es la búsqueda de la ecoeficiencia, así pues, si se hubiera realizado un ACV de la sal solar binaria, se habría definido los puntos donde falla en materia de sostenibilidad, se habría probado a reducir sus porcentajes en peso e introducir otros nuevos productos que lo sustituyeran, y finalmente se habría hecho una comparativa de los dos escenarios para tomar decisiones. Los desarrolladores de la sal solar Hitec, no hicieron el desarrollo medioambiental sino que estaban buscando una mejora en las propiedades de las sales binarias. Sin saber que, además, estaban realizando un ejercicio de ecoeficiencia.

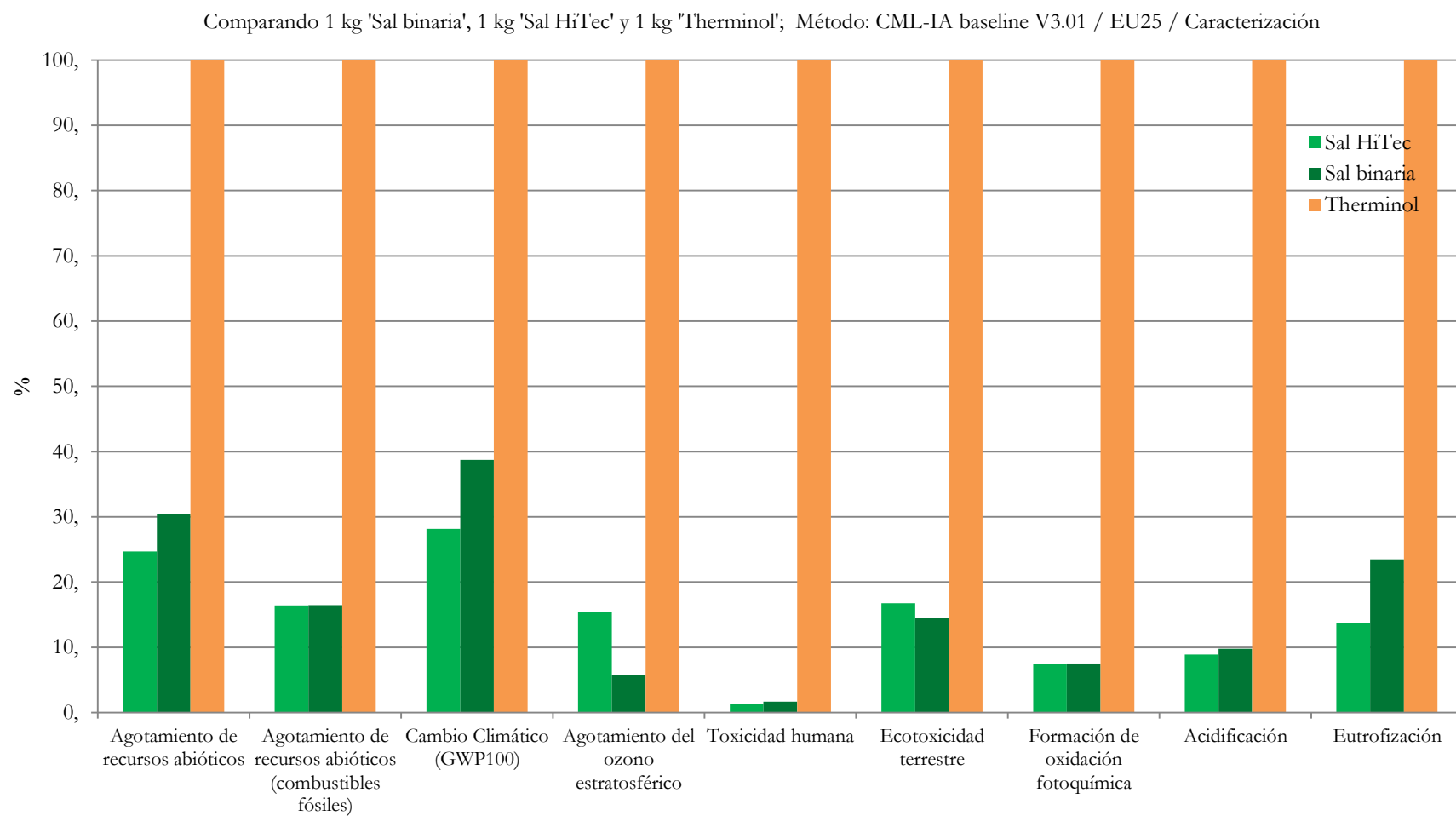


Figura 76 ACV comparativo de los 3 fluidos bajo estudio. Caracterización en CML.

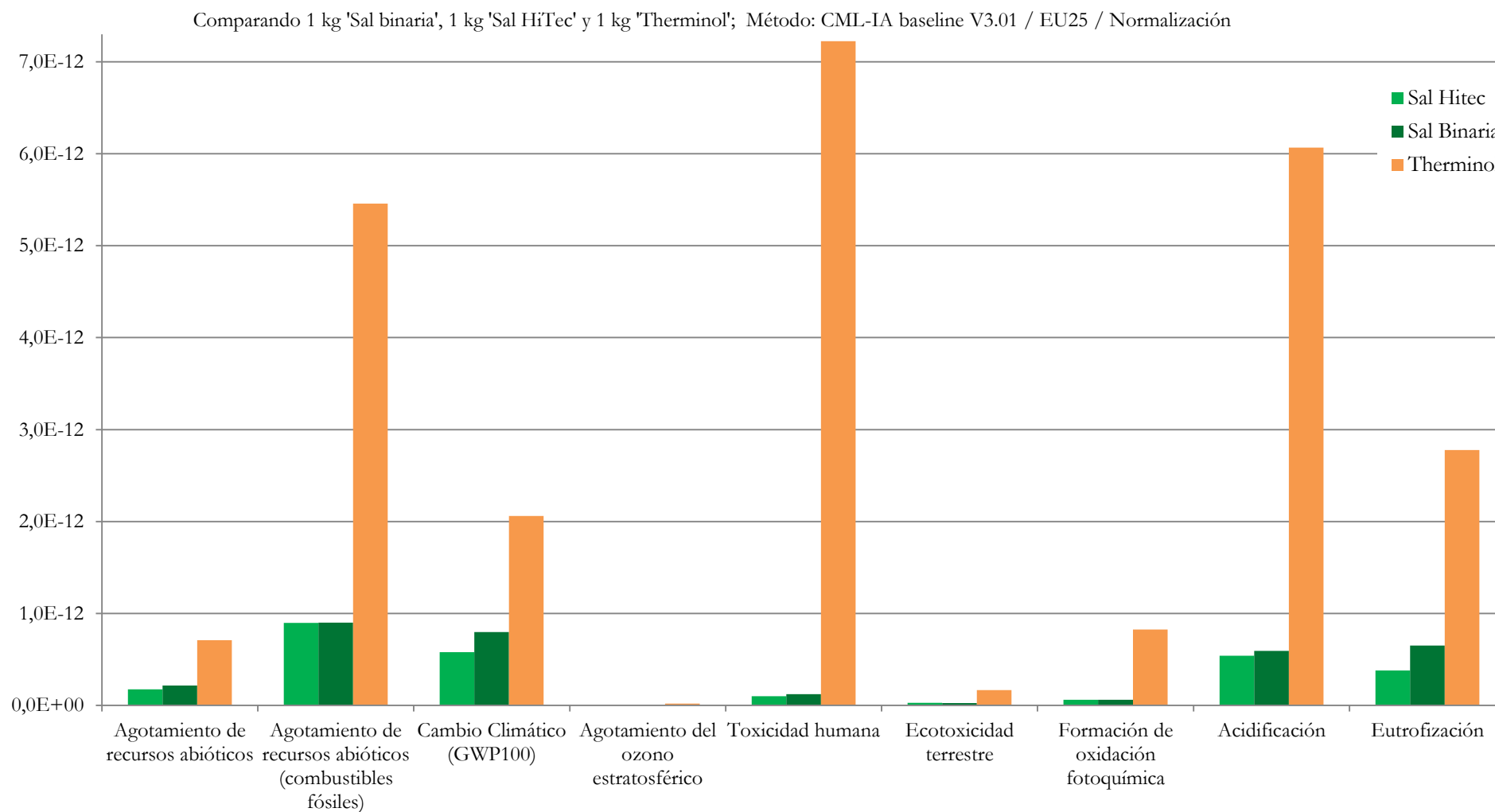


Figura 77. ACV comparativo de los 3 fluidos de transferencia de calor. Normalización en CML.



### 6.3. Evaluación de Impacto de materiales. Procesos unitarios.

#### Huella hídrica.

Para completar el estudio se incluyen los resultados obtenidos con el método Boulay et al para la huella hídrica, dado que en CML no se incluye este indicador y se ha considerado interesante caracterizar los materiales, también, en este aspecto.

#### 6.3.1. Huella hídrica de los aceros.

La caracterización de los 4 aceros estudiados se presenta en la Tabla 60 y se grafica en la Figura 78. El resultado es que el acero 316 vuelve a ser el más dañino de los cuatro en un nuevo indicador más, seguido del P92, luego del T22 y por último del A516. Así pues, si se tuviera que tomar una decisión en la selección de materiales basada en criterios de escasez de agua, se podría decir que para las aplicaciones calientes se recomienda el uso del P92 frente al 316 y para las partes frías, conviene seleccionar T22 en lugar de A516. Al disponer de numerosos indicadores, se pueden aportar decisiones basadas no solo en este criterio sino en todos los demás considerados previamente en CML.

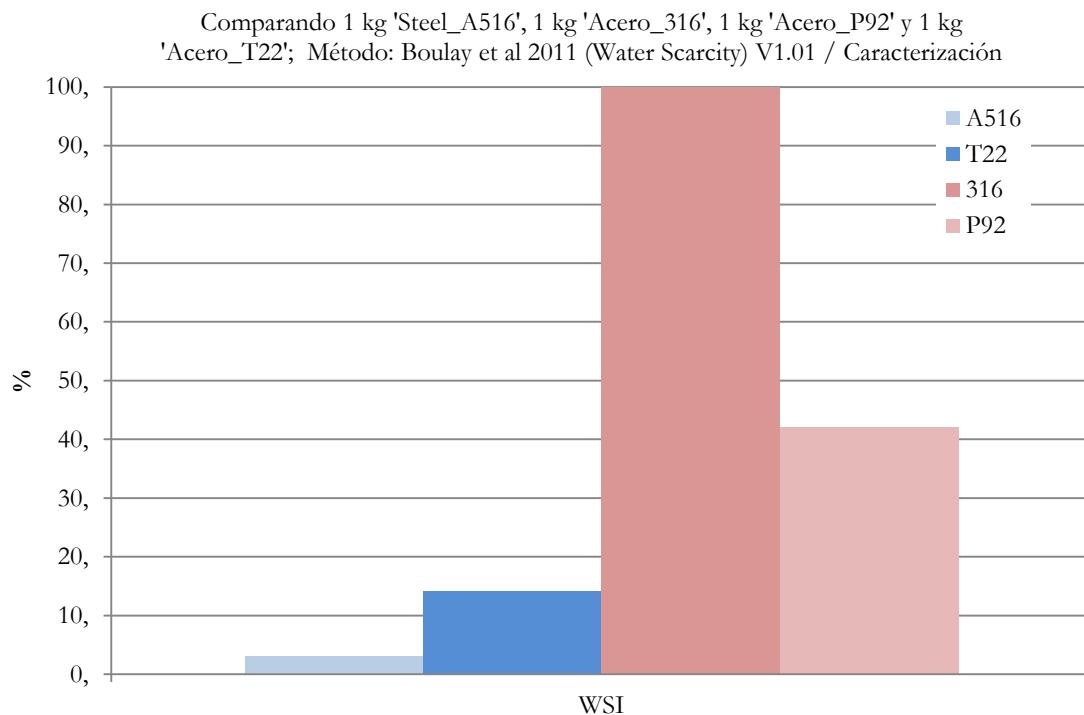


Figura 78. ACV comparativo de los 4 aceros bajo estudio. Caracterización de la Huella Hídrica con el método Boulay et al.

Unidad	Huella Hídrica			
	A516	AISI316	P92	T22
m <sup>3</sup>	5,3260102	178,01404	74,696015	25,247018

Tabla 60. ACV comparativo de los 4 aceros bajo estudio. Caracterización de la Huella Hídrica con el método Boulay et al.

La ventaja de realizar procesos unitarios reside en que se pueden extrapolar las conclusiones de, en este caso, m<sup>3</sup> de agua a m<sup>3</sup> de agua por kg de producto, es decir m<sup>3</sup>/kg. Los resultados arrojan que el AISI 316 tiene un consumo de agua asociado de 178,01 m<sup>3</sup>/kg, seguido del P92 con 74,69 m<sup>3</sup>/kg, después el T22 con 25,25 m<sup>3</sup>/kg y por último el más respetuoso en este ámbito, el A516, con 5,33 m<sup>3</sup>/kg.

### 6.3.2. Huella hídrica de los fluidos de transferencia de calor/almacenamiento térmico.

Al igual que con los aceros, se ha procedido a la obtención de la huella hídrica que implica la producción de cada kg de fluido de almacenamiento/transferencia térmico. Así pues, se ha obtenido una huella hídrica de 9,72 m<sup>3</sup> para el aceite Therminol, 2,10 m<sup>3</sup> para la sal solar Hitec, y 1,77 m<sup>3</sup> para la sal binaria. Con lo que se puede apreciar que el aceite térmico no solo es el más dañino en todas las categorías consideradas en el método CML sino que, además, también es el más perjudicial de los fluidos estudiados, en lo que a huella hídrica se refiere.

Los resultados obtenidos se presentan en forma de tabla en la Tabla 61 y en modo gráfico en la Figura 79.

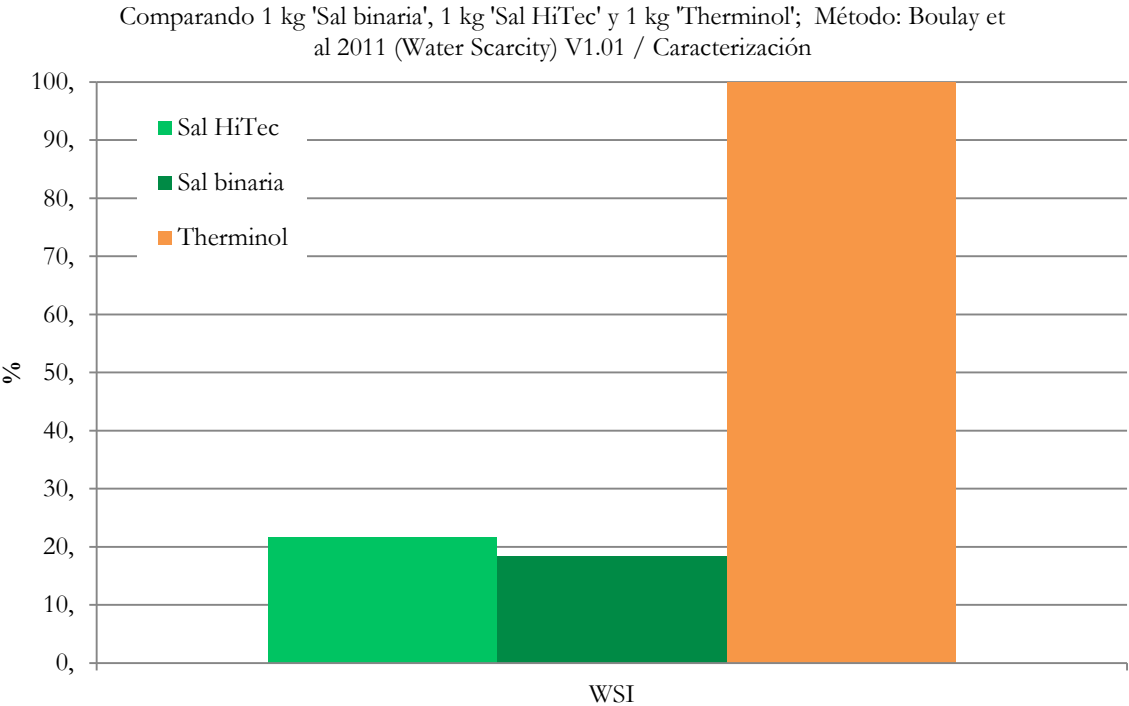


Figura 79. ACV comparativo de los 3 fluidos de transferencia de calor. Caracterización de la Huella Hídrica con el método Boulay et al.

Huella Hídrica			
Unidad	Sal binaria	Sal HiTec	Therminol
m3	1,773584	2,0961586	9,7193743

Tabla 61. ACV comparativo de los 3 fluidos de transferencia de calor. Caracterización de la Huella Hídrica con el método Boulay et al.

## 6.4. Descripción del software System Advisor Model (SAM).

SAM es un software desarrollado por NREL<sup>271</sup>, diseñado para facilitar la toma de decisiones para los usuarios involucrados en la industria de la energía renovable tales como: Ingenieros, jefes de proyecto, analistas financieros, desarrolladores de energía e investigadores.

SAM realiza las predicciones de rendimiento y coste de proyectos de energía conectada a la red sobre la base de los costes de instalación y de funcionamiento y los parámetros de diseño que se especifiquen como entradas al modelo.

La versión actual de SAM incluye modelos para las siguientes tecnologías:

- Sistemas fotovoltaicos (de placa plana y fotovoltaica de concentración)
- CSP cilindro-parabólicos
- CSP torre central (sal fundida y vapor directo)
- CSP Fresnel lineales
- CSP disco Stirling
- Térmica convencional (un modelo simple de transferencia de calor)
- Energía solar térmica para agua caliente sanitaria (ACS) en edificios residenciales o comerciales.
- Energía eólica y minieólica.
- La energía geotérmica y la energía geotérmica de coproducción.
- Energía de biomasa.

Puede comparar los diferentes tipos de proyectos mediante la creación de más de un caso en un archivo. Por ejemplo, se podría comparar el ahorro de un calentador de agua solar en el techo residencial con uno de un sistema fotovoltaico. O, para un proyecto de gran escala de servicio público, se podría comparar el precio de la venta de energía que se requiere para que una instalación eólica, fotovoltaica, o una termosolar fueran rentables.

SAM no modela los sistemas de energía híbrida. Ni los aislados.

---

<sup>271</sup> Blair, N., Dobos, A., Freeman, J., Neises, T., Wagner, M., Ferguson, T., & Janzou, S. (2014). *System advisor model, sam 2014.1. 14: General description*. NREL Rep. No. TP-6A20-61019, Natl. Renew. Energy Lab. Golden, CO, 13.

En esta tesis se ha hecho uso del software SAM para modelar las plantas termosolares cilindro parabólicas bajo estudio. La idea fue conseguir un inventario de materiales. Se requería el estudio de los aceros y los fluidos de transferencia de calor implicados en centrales CCP y gracias a SAM se obtuvieron dichas cantidades para cada caso de estudio. A continuación esto se refleja con detalle.

## **6.5. Modelado de las plantas termosolares cilindro parabólicas. Construcción del Inventario de Ciclo de Vida.**

Es necesario definir cómo son las centrales que se van a estudiar para elaborar un inventario y proceder a realizar el Análisis de Ciclo de Vida de las mismas.

Se ha decidido estudiar el comportamiento medioambiental de diversos aceros (P92, T22, A516 y AISI316), así como fluidos de transferencia y/o almacenamiento de calor (Therminol, sal solar binaria y sal solar Hitec). Estos materiales forman parte de las plantas termosolares por sus características mecánicas, químicas, etc, pero en ningún caso por sus características medioambientales.

Para poder caracterizar los mismos en el seno de una central, no solo es suficiente evaluar 1kg de material y ver sus impactos, tal y como se ha realizado anteriormente, sino que se deben conocer las cantidades en las que se encuentran en las plantas termosolares. Para ello, se tomarán datos de diversas fuentes bibliográficas y del propio modelo creado en el software SAM.

Finalmente, con todo ello, se creará un Inventario de Ciclo de Vida de los aceros y fluidos térmicos involucrados en una central de 50 MW y en una de 150MW. Se cuantificarán los impactos medioambientales de ello y se obtendrán las pertinentes conclusiones.

### 6.5.1. Localización.

Con el software SAM se modelan las plantas solares para una localización en Sevilla (España).

City	Sevilla	Time zone	GMT 1	Latitude	37.42 °N
State	ESP	Elevation	31 m	Longitude	-5.9 °E
Country	Spain	Data Source	IWEC	Station ID	083910
Data file	C:\SAM\2015.6.30\solar_resource\Spain ESP Sevilla (INTL).csv				

<b>Annual irradiance and temperature summary</b>					
Global horizontal	NaN	kWh/m <sup>2</sup> /day	Average temperature	18.4	°C
Direct normal (beam)	4.86	kWh/m <sup>2</sup> /day	Average wind speed	2.7	m/s
Diffuse horizontal	1.75	kWh/m <sup>2</sup> /day			

Figura 80. Pantalla de SAM, indicando la localización elegida. Se muestran las coordenadas del lugar así como los datos de radiación medios y de temperatura y viento.

Los datos climáticos se toman de las bases de datos incorporadas en el software<sup>272</sup>.

El hecho de seleccionar este emplazamiento es debido a que ya existe en esa zona una central solar termoelectrónica, que en su día se proyectaría bajo los criterios de optimización y necesidades de la zona, estos deberían ser una zona deficitaria en generación de energía y/o con aumento creciente de la demanda, una meteorología adecuada, posibilidades de evacuación de la energía producida, buenos accesos, topografía suave, llanuras, disponibilidad de agua para la correcta refrigeración. Todo ello con el menor impacto medioambiental posible.

La zona tiene unas buenas condiciones ambientales. Se aprecia que es una zona de vientos suaves (2,7 m/s de velocidad media anual) y temperaturas cálidas (media anual de 18,4°C) con irradiación diarias elevadas tanto directa (4,86 kWh/m<sup>2</sup>) como difusa (1,75 kWh/m<sup>2</sup>).

Es una zona con terrenos llanos y con buenos accesos y agua, así pues se trata de unas características compatibles con la instalación.

<sup>272</sup> *International Weather for Energy Calculations* / [ashrae.org](http://ashrae.org). (2016). *Ashrae.org*. Accedido el 6 abril 2016, desde <https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/international-weather-for-energy-calculations>

Con el fin de realizar un estudio final entre dos centrales de diferentes potencias, se elige la misma localización para ambas de tal modo que el factor climático no sea determinante, es decir, para poder estudiar toda la fenomenología medioambiental, se quedarán fijas las condiciones de contorno iniciales; una misma localización.

## **6.5.2. Central termosolar de 50 MW. Características.**

### **6.5.2.1. Bloque de potencia.**

La elección de una planta termosolar de 50 MW está basada en que debido a la regulación legislativa española, las centrales termosolares, para acogerse a las bonificaciones del Real Decreto 661/2007, estaban limitadas a esa potencia de 50MW. Así pues, en España, no hay proyectos con capacidad instalada superior. Lo que hicieron algunas plantas termosolares, fue colocar bloques de potencias de 50MW. Es el caso, por ejemplo, de Andasol, compuesta por tres bloques de 50 MW, Andasol 1, Andasol 2 y Andasol 3<sup>273</sup>.

---

<sup>273</sup> Millennium, S. (2008). *The parabolic trough power plants Andasol 1 to 3*. Tech. Solar Millennium AG.

Plant Capacity	
Design gross output	50 MWe
Estimated gross to net conversion factor	0.9
Estimated net output at design (nameplate)	45 MWe
Parasitic losses typically reduce net output to approximately 90 % of design gross power	

Power Block Design Point	
Rated cycle conversion efficiency	0.3774
Design inlet temperature	391 °C
Design outlet temperature	293 °C
Boiler operating pressure	100 bar
Steam cycle blowdown fraction	0.02
Fossil backup boiler LHV efficiency	0.9
Aux heater outlet set temp	391 °C
Fossil dispatch mode	Minimum backup level

Plant Control	
Low resource standby period	2 hrs
Fraction of thermal power needed for standby	0.2
Power block startup time	0.5 hr
Fraction of thermal power needed for startup	0.2
Minimum required startup temp	300 °C
Max turbine over design operation	1.05
Min turbine operation	0.25
Turbine inlet pressure control	Fixed pressure

Figura 81. Características del bloque de potencia de la central termosolar de 50MW. Fuente: Modelado en SAM.

El diseño de esta central se realizará para una potencia bruta de 50MW lo que arroja una neta estimada de 45 MW. Debido al factor de conversión de potencia bruta a neta estimado de 0,9, se conoce que las pérdidas típicamente reducen la potencia de salida neta aproximadamente a un 90% de la potencia bruta diseñada.

El ciclo de potencia tiene un rendimiento de conversión de 0,3774, con una temperatura de diseño del vapor de entrada de 391°C y de salida de 293° C. Con una presión de 100 bares.

#### 6.5.2.2. Almacenamiento térmico.

Se diseña en base a un almacenamiento térmico con sales fundidas de 12h. La elección del tiempo de almacenamiento está basado en el levelized cost of energy, o costes nivelados de la energía en su traducción al castellano, que es una herramienta que sirve



Full load hours of TES	12	hr	Tank heater capacity	25	MWht
Storage volume	20767.7	m <sup>3</sup>	Tank heater efficiency	0.98	
TES Thermal capacity	1589.83	MWht	Hot side HX approach temp	5	°C
Parallel tank pairs	1		Cold side HX approach temp	5	°C
Tank height	20	m	Thermal storage exergetic efficiency	1.000	
Tank fluid min height	1	m	Initial TES fluid temp	300	°C
Tank diameter	36.3608	m	Storage HTF fluid	Hitec Solar Salt	
Min fluid volume	1038.38	m <sup>3</sup>	User-defined HTF fluid	Edit...	
Tank loss coeff	0.4	W/m <sup>2</sup> -K	Storage HTF min operating temp	238	°C
Estimated heat loss	0.428003	MWht	Storage HTF max operating temp	593	°C
Cold tank heater set point	250	°C	Fluid temperature	342	°C
Hot tank heater set point	365	°C	TES fluid density	1872.49	kg/m <sup>3</sup>
			TES specific heat	1.50182	kJ/kg-K

						Design Point Totals	
Piping thermal loss coefficient		0.45	W/m <sup>2</sup> -K				
Tracking power		125	W/sca	Tracking		103500	W
Required pumping power for HTF through power block		0.55	kJ/kg				
Required pumping power for HTF through storage		0.15	kJ/kg				
Fraction of rated gross power consumed at all times		0.0055		Fixed		0.275	MWe
		Factor	Coeff 0	Coeff 1	Coeff 2		
BOP parasitic value	0	MWe/MWcap	1	0.483	0.517	0	BOP 0 MWe
Aux heater parasitic value	0.02273	MWe/MWcap	1	0.483	0.517	0	Aux 1.1365 MWe

<sup>275</sup> Herrmann, U., Kelly, B., & Price, H. (2004). *Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants*. *Energy*, 29(5-6). 883-893.

También se incluyen la pérdida parásita, que se refiere a la energía consumida por la propia planta para producir electricidad, y se compone principalmente la energía eléctrica para el bombeo del fluido de transferencia de calor junto con la energía utilizada para el control del posicionamiento de los colectores. La pérdida parásita es típicamente alrededor de 5-10%<sup>276</sup> de la eléctrica bruta, dependiendo del nivel de almacenamiento.

### 6.5.2.3. Receptores solares.

Los resultados de la modelización en SAM arrojan que una central localizada en Sevilla, con tecnología cilindro parabólica de 50MW con 12h de almacenamiento térmico en sales fundidas se compone de un campo solar como el que se detalla en la Figura 84.

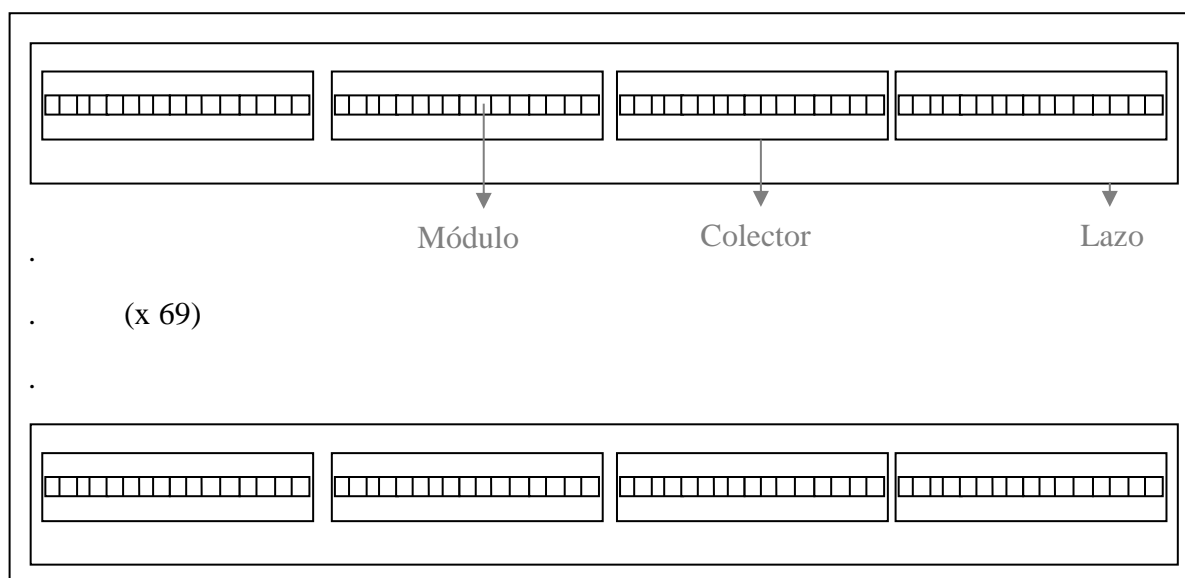


Figura 84. Esquema de la planta termosolar de 50 WM. Fuente: Elaboración propia.

<sup>276</sup> Hinkley, J., Curtin, B., Hayward, J., Wonhas, A., Boyd, R., Grima, C., & Mikhail, A. (2011). *Concentrating solar power—drivers and opportunities for cost-competitive electricity*. Clayton South: CSIRO.

**Solar Field Parameters**

☒ Option 1: Solar multiple 
☐ Option 2: Field aperture  m<sup>2</sup>

Row spacing  m  
Stow angle  deg  
Deploy angle  deg  
Number of field subsections

Header pipe roughness  m  
HTF pump efficiency   
Freeze protection temp  °C  
Irradiation at design  W/m<sup>2</sup>  
Allow partial defocusing ☒

**Heat Transfer Fluid**

Field HTF fluid 
User-defined HTF fluid

Field HTF min operating temp  °C  
Field HTF max operating temp  °C  
Design loop inlet temp  °C  
Design loop outlet temp  °C  
Min single loop flow rate  kg/s  
Max single loop flow rate  kg/s  
Min field flow velocity  m/s  
Max field flow velocity  m/s  
Header design min flow velocity  m/s  
Header design max flow velocity  m/s

**Design Point**

Single loop aperture  m<sup>2</sup>  
Loop optical efficiency   
Total loop conversion efficiency   
Total required aperture, SM=1  m<sup>2</sup>  
Required number of loops, SM=1

Actual number of loops   
Total aperture reflective area  m<sup>2</sup>  
Actual solar multiple   
Field thermal output  MWt

**Collector Orientation**

Collector tilt  deg  
Collector azimuth  deg

Tilt: horizontal=0, vertical=90  
Azimuth: equator=0, west=90, east=-90

**Mirror Washing**

Water usage per wash  L/m<sup>2</sup>, aper.  
Washes per year

**Plant Heat Capacity**

Hot piping thermal inertia  kWh/K-MWt  
Cold piping thermal inertia  kWh/K-MWt  
Field loop piping thermal inertia  Wh/K-m

**Land Area**

Solar field area  acres  
Non-solar field land area multiplier   
Total land area  acres

**Single Loop Configuration**

The specification below is only for one loop in the solar field.

Usage tip: To configure the loop, choose whether to edit SCAs, HCEs or defocus order. Select assemblies by clicking one or dragging the mouse over multiple items. Assign types to selected items by pressing keys 1-4.

Number of SCA/HCE assemblies per loop: 
☒ Edit SCAs
☐ Edit HCEs
☐ Edit Defocus Order

SCA: 1	SCA: 1	SCA: 1	SCA: 1	SCA: 1	SCA: 1
HCE: 1 DF# 12	HCE: 1 DF# 11	HCE: 1 DF# 10	HCE: 1 DF# 9	HCE: 1 DF# 8	HCE: 1 DF# 7
SCA: 1	SCA: 1	SCA: 1	SCA: 1	SCA: 1	SCA: 1
HCE: 1 DF# 1	HCE: 1 DF# 2	HCE: 1 DF# 3	HCE: 1 DF# 4	HCE: 1 DF# 5	HCE: 1 DF# 6

Figura 85. Características del campo solar de la central de 50MW. Fuente: Modelización en SAM

El campo solar está compuesto por:

- 69 lazos
- 4 colectores
- 12 módulos

El colector utilizado para el modelo se trata del modelo Solargenix SGX-1, como se aprecia en la Figura 86, el cual tiene una longitud de 100 m.

**Collector Library**

Search for:  Name

Name	Reflective ...	Aperture w...	Length of ...	Number of...	Average su...
Luz LS-2	235	5	49	6	1.8
Luz LS-3	545	5.75	100	12	2.11
Solargenix SGX-1	470.3	5	100	12	1.8
AlbiasaTrough AT150 (Manufacturer Specifications)	817.5	5.774	150	12	2.11

Collector types in loop configuration **Cold - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - Hot**

**Collector Type 1**

Collector name from library

**Collector Geometry**

Reflective aperture area	<input type="text" value="470.3"/> m <sup>2</sup>	Number of modules per assembly	<input type="text" value="12"/>
Aperture width, total structure	<input type="text" value="5"/> m	Average surface-to-focus path length	<input type="text" value="1.8"/> m
Length of collector assembly	<input type="text" value="100"/> m	Piping distance between assemblies	<input type="text" value="1"/> m

**Optical Parameters**

Incidence angle modifier coefficients	<input type="button" value="Edit data..."/>	Geometry effects	<input type="text" value="0.98"/>
Tracking error	<input type="text" value="0.994"/>	Mirror reflectance	<input type="text" value="0.935"/>
General optical error	<input type="text" value="0.99"/>	Dirt on mirror	<input type="text" value="0.95"/>

**Optical Calculations**

Length of single module	<input type="text" value="8.33333"/> m	End loss at summer solstice	<input type="text" value="0.999627"/>
IAM at summer solstice	<input type="text" value="1.00192"/>	Optical efficiency at design	<input type="text" value="0.85661"/>

Figura 86. Características técnicas del collector. Fuente: Modelización en SAM.

El receptor solar con el que se ha realizado la simulación es el Schott PTR70, cuyas características geométricas de su tubo absorbedor son las que se pueden apreciar en la Figura 87.

**Receiver Geometry**

Absorber tube inner diameter	<input type="text" value="0.066"/> m	Absorber flow plug diameter	<input type="text" value="0"/> m
Absorber tube outer diameter	<input type="text" value="0.07"/> m	Internal surface roughness	<input type="text" value="4.5e-005"/>
Glass envelope inner diameter	<input type="text" value="0.115"/> m	Absorber flow pattern	<input type="text" value="Tube flow"/>
Glass envelope outer diameter	<input type="text" value="0.12"/> m	Absorber material type	<input type="text" value="304L"/>

Figura 87. Características geométricas del tubo absorbedor. Fuente: Modelización en SAM

Una vez se tiene toda la información, se procede a tomar los datos que serán necesarios para elaborar el inventario. Así pues, se deduce un volumen de acero que será el que componga el cilindro metálico que va insertado en el receptor solar, y vendrá determinado por la Ecuación 26, que tiene como variable la Ecuación 25, que se presentan a continuación.

$$l_d = n_l \cdot n_c \cdot l_c$$

Ecuación 25

Donde:

$l_d$  longitud de diseño, [m].

$n_l$  número de lazo, [-].

$n_c$  número de colectores, [-].

$l_c$  longitud del colector, [m].

$$V_e = (d_e^2 - d_i^2) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot l_d$$

Ecuación 26

Donde:

$V_e$  volumen exterior, correspondiente al acero, [m<sup>3</sup>].

$d_e$  diámetro exterior, [m].

$d_i$  diámetro interior, [m].

$l_d$  longitud de diseño, [m].

Del mismo modo, el interior del tubo será el lugar donde se encuentre el fluido de transferencia de calor (HTF, por sus siglas en inglés) así pues, este volumen también será necesario conocerlo a la hora de obtener las cantidades de aceite o sal que circulan por el interior de los mismos. Para ello, se dispone de la Ecuación 27.

$$V_i = d_i^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot l_d$$

Ecuación 27

Donde:

$V_i$  volumen interior, correspondiente a HTF, [m<sup>3</sup>].

$d_i$  diámetro interior, [m].

$l_d$  longitud de diseño, [m].

Conociendo el volumen, habrá que conocer la densidad de los elementos a estudiar para así conocer su masa.

Para conocer la densidad de las sales, se toman correlaciones que recopilan Serrano-López R. et al<sup>277</sup>. Para la densidad del Therminol se aplica la relación que indica su informe de especificaciones técnicas<sup>278</sup>. Se presentan a continuación en la Tabla 62.

		<b>Rango de temperatura [K]</b>
<b>Sal solar binaria</b> <sup>279</sup>	$2263,628 - 0,636 \cdot T[K]$ Ecuación 28	(573-873)
<b>Sal solar Hitec</b> <sup>280</sup>	$2279,799 - 0,7324 \cdot T [K]$ Ecuación 29	(448-773)
<b>Therminol</b>	$-0,614254 \cdot T [^{\circ}C] - 0,000321 \cdot T^2 [^{\circ}C] + 1020,62$ Ecuación 30	(273-653)

Tabla 62. Correlaciones de densidad [kg/m<sup>3</sup>] para las sales estudiadas en función de la temperatura sugirieron para las sales estudiadas.

Las densidades de los aceros se toman de bibliografía, para conocerlas, se recomienda ver el capítulo 5 MATERIALES A ESTUDIO.

La masa de acero se obtendrá en función de su densidad, para el volumen especificado de tubo, y con la Ecuación 31.

<sup>277</sup> Serrano-López, R., Fradera, J., & Cuesta-López, S. (2013). *Molten salts database for energy applications*. Chemical Engineering And Processing: Process Intensification, 73, 87-102.

<sup>278</sup> Solutia. (2016). *Therminol 66. High performance. Highly stable. Heat Transfer Fluid*. Therminol.org

<sup>279</sup> D. A. Nissen, (1982) *Journal of Chemical & Engineering*, Data 27 269-273.

<sup>280</sup> NREL, (2016). *S.A.M. (System Advisor Model)*.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad ; \quad m = \rho \cdot V$$

Ecuación 31

Donde:

$\rho$  densidad, [kg/m<sup>3</sup>].

m masa, [kg].

V volumen, [m<sup>3</sup>].

Así pues, se tiene un volumen de acero de 11,79 m<sup>3</sup>.

$$l_d = 69 \cdot 4 \cdot 100 = 27600 \text{ m}$$

$$V_e = (0,07^2 - 0,066^2) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 27600 = 11,79 \text{ m}^3$$

Este volumen podrá estar conformado por acero de un tipo u otro y así dependerá, por tanto, su masa. Es aquí, donde se introduce la suposición de que el volumen de acero será de las tipologías a estudiar en la presente tesis doctoral.

El circuito primario soporta altas temperaturas por ello, para esta parte de la instalación, se evaluarán, entonces, los aceros P92 y 316.

$$\text{El volumen interno resulta: } V_i = 0,066^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 27600 = 94,425 \text{ m}^3$$

La masa de este volumen dependerá de si se trata de sal binaria o Hitec, ya que tiene diferentes propiedades fisicoquímicas. También podrá circular por el interior de los tubos, aceite térmico, Therminol.

A continuación se presenta una tabla (Tabla 63) con los valores de densidad de los posibles materiales conformantes del sistema.

	Densidad, $\rho[\text{kg/m}^3]$
<b>T92</b>	7700
<b>316</b>	8000
<b>Binaria a 550° C</b>	1740,2
<b>Hitec a 550° C</b>	1676,9
<b>Therminol a 340° C</b>	774,8

Tabla 63. Densidades  $[\text{kg/m}^3]$  de materiales bajo estudio.

Con la Ecuación 31, se obtienen unas masas de:

	masa, [kg]
<b>T92</b>	90798,4
<b>316</b>	94320,0
<b>Binaria a 550° C</b>	164318,4
<b>Hitec a 550° C</b>	158337,8
<b>Therminol</b>	73160,5

Tabla 64. Masas [kg] de materiales bajo estudio.

El tubo absorbedor estará construido en un acero y lo recorrerá una determinada sal o aceite. Las combinaciones posibles son:

ACERO	HTF
P92	Sal binaria
P92	Sal Hitec
P92	Therminol
316	Sal binaria
316	Sal Hitec
316	Therminol

Tabla 65. Posibilidades de combinación de material del absorbedor y fluido de transferencia de calor (HTF). Fuente: Elaboración propia.



#### 6.5.2.4. Conducciones y sistema de intercambio.

Se toma como referencia la planta solar Andasol I, cilindro-parabólica de concentración, con almacenamiento térmico con sales fundidas de 7,5h. Se asumen las mismas cantidades de acero para el modelo de central de 50MW desarrollado en la presente tesis doctoral.

Las cantidades de acero, para conducciones del circuito primario y el sistema de intercambio, en Andasol I<sup>281</sup> y por tanto, las que se tomarán para el estudio son:

- Conducciones: 106986 kg; las conducciones del circuito primario se ven sometidas a temperaturas superiores a 550°C, por lo que los aceros de los que van a estar compuestas en estas simulaciones serán de acero P92 o bien 316.
- Intercambio: 57000 kg; del mismo modo, el sistema de intercambio del circuito primario, debe soportar temperaturas superiores a 550°C, por lo que los aceros que conformarán este elemento en las simulaciones de esta tesis serán acero P92 o 316.

---

<sup>281</sup> Viebahn, P., Kronshage, S., & Lechon, Y. (2008). *Deliverable n 12.2-RS Ia" Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants*. New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS) Integrated Project, EU 6th Framework Programme, Brussels.

### 6.5.2.5. Tanques.

En la Figura 89 se expone la vista aérea de una central termosolar cilindro parabólica, en la que se pueden diferenciar los tanques de almacenamiento térmico.

En este apartado, se necesita conocer las capacidades que son necesarias para tener una acumulación térmica de 12h en la central seleccionada. Para ello, se procede al modelado en SAM introduciendo los valores que se buscan. Así, el propio modelo aportará información de la cual se podrán extraer cantidades de aceros y sales componentes en el sistema.

Los parámetros generales que se encuentran en la central que se está analizando, es decir, una de 50 MW de potencia, se pueden apreciar en la Figura 88. En ella se ha introducido los datos requeridos tales como almacenamiento térmico de 12h, para lo cual el propio sistema indica, en base a las características de la planta en cuestión, las dimensiones de los tanques y las características técnicas de su operación, tal como temperatura de operación mínima (238°C, en el caso de 50MW con sal Hitec), temperatura de operación máxima (593°C, en el caso de 50MW con sal Hitec). La densidad del fluido, su calor específico, la eficiencia de almacenamiento exergética, el coeficiente de pérdidas, los puntos de temperatura de ajuste, etc.

Full load hours of TES	12 hr	Tank heater capacity	25 MWht
Storage volume	20767.7 m <sup>3</sup>	Tank heater efficiency	0.98
TES Thermal capacity	1589.83 MWht	Hot side HX approach temp	5 °C
Parallel tank pairs	1	Cold side HX approach temp	5 °C
Tank height	20 m	Thermal storage exergetic efficiency	1.000
Tank fluid min height	1 m	Initial TES fluid temp	300 °C
Tank diameter	36.3608 m	Storage HTF fluid	Hitec Solar Salt
Min fluid volume	1038.38 m <sup>3</sup>	User-defined HTF fluid	Edit...
Tank loss coeff	0.4 W/m <sup>2</sup> -K	Storage HTF min operating temp	238 °C
Estimated heat loss	0.428003 MWt	Storage HTF max operating temp	593 °C
Cold tank heater set point	250 °C	Fluid temperature	342 °C
Hot tank heater set point	365 °C	TES fluid density	1872.49 kg/m <sup>3</sup>
		TES specific heat	1.50182 kJ/kg-K

Figura 88. Parámetros generales del Sistema de almacenamiento térmico de la central de 50MW. Fuente: Modelado en SAM.

Se ha realizado la modelización en SAM y se han obtenido numerosos resultados. En la Figura 90, se presenta un gráfico que aporta información sobre el almacenamiento térmico total, es decir, la suma de los tanques. En él se tiene que el almacenamiento total mínimo es de 19.000 m<sup>3</sup> y el máximo de 22.000 m<sup>3</sup>. Se aprecia que en los meses estivales el almacenamiento es inferior, subiendo el mismo en los meses de invierno.



Figura 89. Vista aérea de la planta solar Andasol. Fuente: NREL.

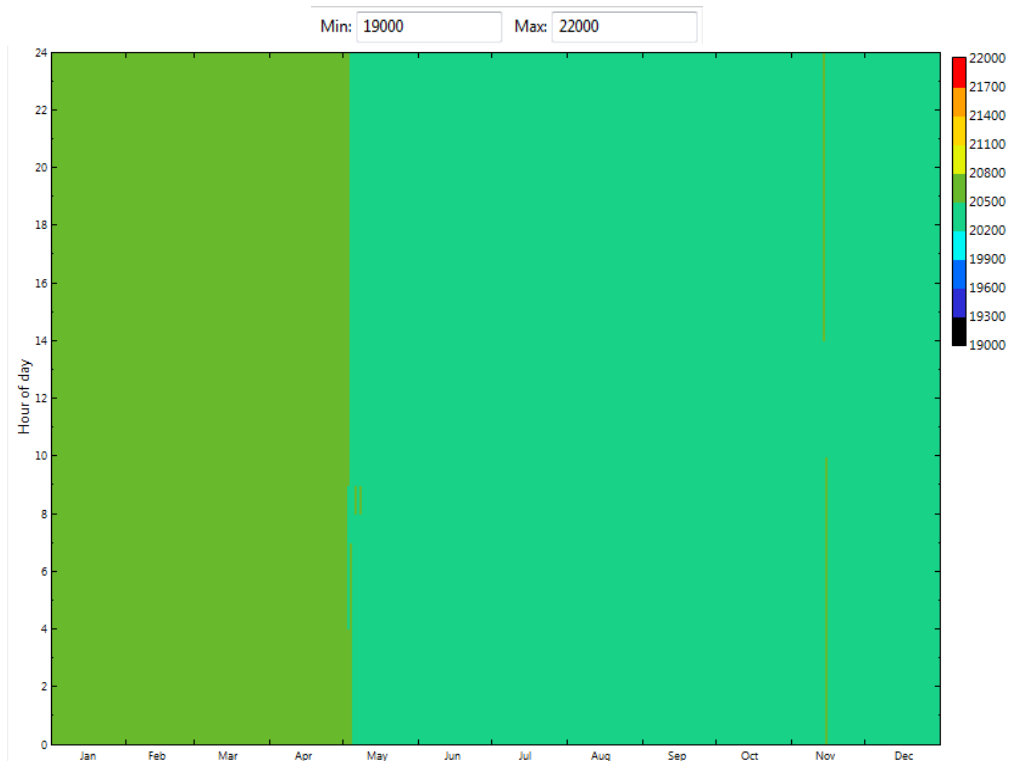


Figura 90. TES volumen total ( $\text{m}^3$ ).Relación entre el volumen en el tanque, y los meses y franja horaria.

Volumen total. Fuente: Modelado en SAM.

Tras analizar el almacenamiento total, se obtienen las secuencias para el tanque frío y el caliente individualmente. Esto queda reflejado en la Figura 91 (tanque frío) y Figura 92(tanque caliente). En ellas se pueden comprobar las fluctuaciones horarias que sufren los tanques. Durante la noche el tanque de almacenamiento térmico cede su calor para producir energía, así pues, desciende su volumen pasándolo al tanque de sales frías, durante el día, ese volumen inferior que está en el tanque caliente verá incrementar su volumen poco a poco, por el paso del tanque frío al caliente, de las sales, y se irá incrementando su temperatura para, así volver al ciclo. Por ello, durante las horas centrales del día el tanque caliente tiene menos volumen que en la noche, y viceversa con el frío.



Figura 91. TES volumen total ( $\text{m}^3$ ).Relación entre el volumen en el tanque, y los meses y franja horaria.

Tanque frío. Fuente: Modelado en SAM.

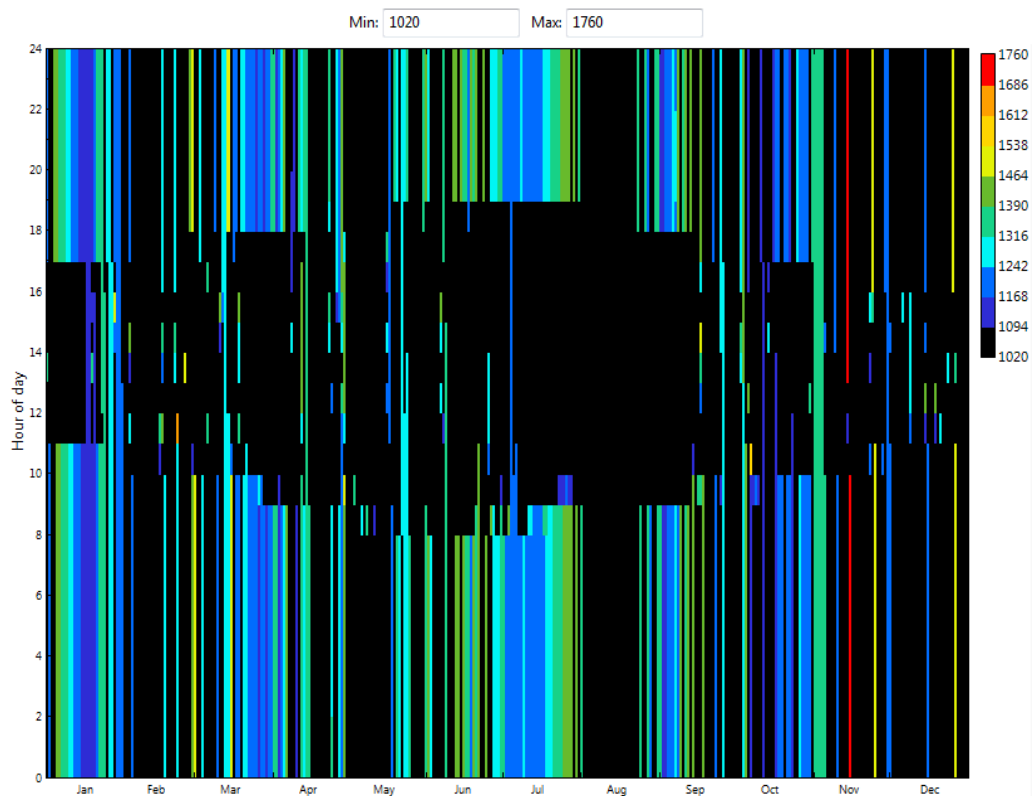


Figura 92. TES volumen total ( $\text{m}^3$ ).Relación entre el volumen en el tanque, y los meses y franja horaria.

Tanque caliente. Fuente: Modelado en SAM.

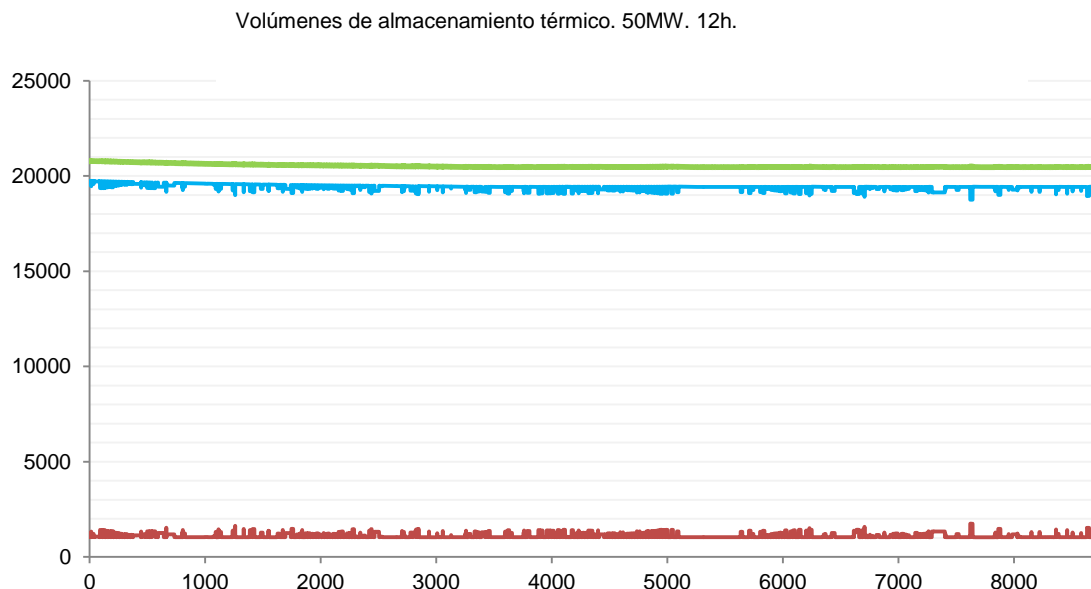


Figura 93. Volumen ( $\text{m}^3$ ) de los tanques de almacenamiento. Frío, en azul. Caliente, en rojo. Suma de ambos, verde. Fuente: Elaboración propia con datos de la simulación en SAM.

La Figura 93 representa, para cada serie, 8760 valores, uno día de un año completo, con un volumen medio de acumulación en el tanque por día. Así pues, se tiene que de media, los volúmenes de sales fundidas en los tanques de almacenamiento son:

- MEDIA TANQUE CALIENTE:  $1118,747999 \text{ m}^3$
- MEDIA TANQUE FRÍO:  $19401,96717 \text{ m}^3$

Así pues, con todo lo anterior, se establece un procedimiento para obtener masa de acero de los tanques de almacenamiento como continúa:

Con el volumen máximo de sales, se construye el volumen de los tanques.

Para el caso de 50MW, los volúmenes máximos de sales en los tanques frío y caliente son  $21.000 \text{ m}^3$  y  $1.760 \text{ m}^3$  respectivamente ver Figura 91 y Figura 92.

Para una mayor simplicidad en los cálculos, se toma un volumen cilíndrico como arquitectura de todos los depósitos. El espesor de la lámina de acero que se encuentra en contacto con las sales es de  $6\text{mm}^{282}$ , siguiendo las recomendaciones de la Norma API 650.

Se fija una altura para los depósitos de 15m.

<sup>282</sup> Standard, A. P. I. (2007). *650, Welded steel tanks for oil storage*. American Petroleum Institute.

$$V_i = \pi \cdot r_t^2 \cdot h ; \quad r_t = \sqrt{\frac{V_i}{\pi \cdot h}}$$

Ecuación 32. Volumen interior del tanque y radio del tanque

$$V_a = (2 \cdot \pi \cdot r_t \cdot h \cdot e) + 2 \cdot (\pi \cdot r_t^2 \cdot e)$$

Ecuación 33. Volumen de acero que compone el tanque.

Donde:

$V_i$  volumen, [m<sup>3</sup>].

$r_t$  radio del tanque, [m].

$h$  altura del tanque, [m].

$e$  espesor del acero del tanque, [m].

$V_a$  volumen de acero, [m<sup>3</sup>].

Siguiendo las ecuaciones anteriores, se llegan a los resultados de radios de tanque y volumen de acero, para el tanque frío y caliente, siguientes (Tabla 66):

	Tanque frío	Tanque caliente
$V_i$	21000 m <sup>3</sup>	1760 m <sup>3</sup>
$e$	0,006 m	0,006 m
$h$	15 m	15 m
$r_{\text{tanque}}$	21,11 m	6,11 m
$V_a$	28,74 m <sup>3</sup>	4,86 m <sup>3</sup>

Tabla 66. Características geométricas de los tanques del modelo de 50MW, así como los volúmenes de acero que los conforman.

La masa de acero, según la Ecuación 31, dependerá del tipo de acero utilizado. Se presentan los detalles en la tabla a continuación.

Se toma el volumen medio de las sales de cada tanque, ver Figura 93. Con este volumen, las densidades pertinentes (obtenidas con Ecuación 28 y Ecuación 29) y la Ecuación 31, se obtienen las masas de sales que se estudiarán.

En la Tabla 67 se presentan las cantidades de aceros y sales a considerar en el posterior estudio de ACV, para una central cilindro-parabólica con almacenamiento térmico.

		Tanque caliente		Tanque frío	
ACEROS	Tipo de acero	P92	316	A516	T22
	$\rho$ densidad, [kg/m <sup>3</sup> ].	7700	8000	78500	77600
	m masa, [kg].	37451,84	38911,01	2.255.889,6	2.230.025,8
SALES	Volumen sales [m <sup>3</sup> ]	1118,75		19401,97	
	Temperatura sales [°C]	550		290	
	$\rho$ densidad Hitec, [kg/m <sup>3</sup> ]	1676,86		1867,29	
	$\rho$ densidad Binaria, [kg/m <sup>3</sup> ]	1740,20		1905,56	
	m masa Hitec, [kg].	1.875.986,90		36.229037,19	
	m masa Binaria, [kg].	1.946.845,26		36.971.612,56	

Tabla 67. Resultados en kg de acero y sales. Estos formarán parte del inventario de ACV.

### 6.5.3. Central termosolar de 150 MW. Características.

Existen estudios<sup>283</sup> con los que se puede determinar, entre otras otras muchas variables, que las condiciones económico técnicas de una planta termosolar de tecnología cilindro parabólica, óptimas se encuentran en un rango en torno a los 150 MW.

Tal y como se ha modelado la central de 50 MW, se modela la de 150 MW, para poder obtener conclusiones sobre cómo afecta la escala en los impactos. Así pues, el procedimiento seguido para llegar a cuantificar la cantidad de aceros y fluidos de transferencia/almacenamiento de calor, es el mismo realizado en el apartado anterior para la central de 50M. La localización de la planta es la misma, Sevilla, y, a continuación, se presentan el resto de características de la termosolar de 150 MW.

<sup>283</sup> Dominguez, R., Baringo, L., & Conejo, A. J. (2012). *Optimal offering strategy for a concentrating solar power plant*. Applied Energy, 98, 316-325.



### 6.5.3.1. Almacenamiento térmico.

Se diseña en base a un almacenamiento térmico con sales fundidas de 12h. La elección del tiempo de almacenamiento está basado, al igual que en el modelo de 50MW, en la optimización del levelized cost of energy, o costes nivelados de la energía en su traducción al castellano.

### 6.5.3.2. Receptores solares.

Los resultados de la modelización en SAM arrojan que una central localizada en Sevilla, con tecnología cilindro parabólica, de 150MW, con 12h de almacenamiento térmico en sales fundidas tiene un campo solar compuesto por 207 lazos, con 4 colectores y 12 módulos cada uno.

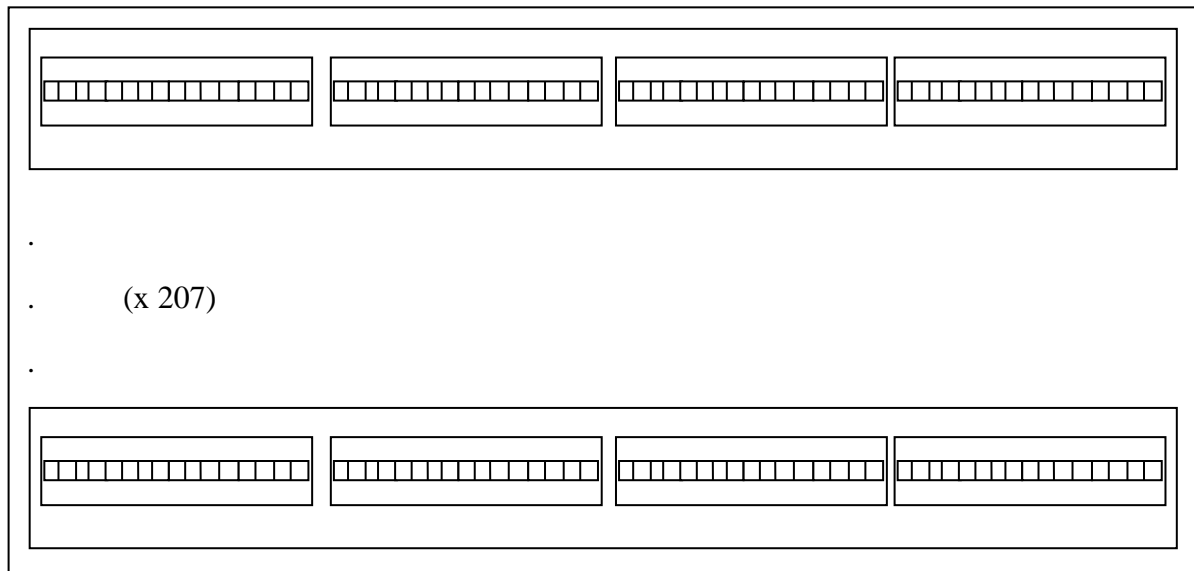


Figura 94. Esquema del campo solar de la central termosolar cilindro-parabólica de 150 MW. Fuente: Elaboración propia.

Solar Field Parameters		Heat Transfer Fluid	
<input checked="" type="radio"/> Option 1:	Solar multiple <input type="text" value="2"/>	Field HTF fluid	<input type="text" value="Hitec Solar Salt"/>
<input type="radio"/> Option 2:	Field aperture <input type="text" value="877,000.000"/> m <sup>2</sup>	User-defined HTF fluid	<input type="button" value="Edit..."/>
	Row spacing <input type="text" value="15"/> m	Field HTF min operating temp	<input type="text" value="238"/> °C
	Stow angle <input type="text" value="170"/> deg	Field HTF max operating temp	<input type="text" value="593"/> °C
	Deploy angle <input type="text" value="10"/> deg	Design loop inlet temp	<input type="text" value="293"/> °C
	Number of field subsections <input type="text" value="2"/>	Design loop outlet temp	<input type="text" value="391"/> °C
	Header pipe roughness <input type="text" value="4.57e-005"/> m	Min single loop flow rate	<input type="text" value="1"/> kg/s
	HTF pump efficiency <input type="text" value="0.85"/>	Max single loop flow rate	<input type="text" value="12"/> kg/s
	Freeze protection temp <input type="text" value="150"/> °C	Min field flow velocity	<input type="text" value="0.153546"/> m/s
	Irradiation at design <input type="text" value="950"/> W/m <sup>2</sup>	Max field flow velocity	<input type="text" value="1.90492"/> m/s
	Allow partial defocusing <input checked="" type="checkbox"/>	Header design min flow velocity	<input type="text" value="2"/> m/s
	<input type="button" value="Simultaneous"/>	Header design max flow velocity	<input type="text" value="3"/> m/s

Design Point	
Single loop aperture	<input type="text" value="5643.6"/> m <sup>2</sup>
Loop optical efficiency	<input type="text" value="0.744601"/>
Total loop conversion efficiency	<input type="text" value="0.716894"/>
Total required aperture, SM=1	<input type="text" value="583594"/> m <sup>2</sup>
Required number of loops, SM=1	<input type="text" value="103.408"/>
Actual number of loops	<input type="text" value="207"/>
Total aperture reflective area	<input type="text" value="1.16823e+006"/> m <sup>2</sup>
Actual solar multiple	<input type="text" value="2"/>
Field thermal output	<input type="text" value="794.913"/> MWt

Figura 95. Parámetros del campo solar de la central de 150 MW. Fuente: Modelización en SAM.

La Figura 95 muestra algunas características del campo solar del modelo de 150MW, se tienen 207 lazos. Se ha modelado para un HTF de sal solar Hitec, así pues, se tiene una temperatura del operación máxima del fluido de 593°C y una operación mínima desde 238°C, así comotambién se puede apreciar el punto de protección, de 150°C, la eficiencia de la bomba que hace circular las sales, se aprecia la velocidad (o caudal) de ellas y otros parámetros de diseño.

El colector seleccionado se trata, al igual que en el modelo de 50MW, del modelo Solargenix SGX-1, el cual tiene una longitud de 100 m, tal y como se puede apreciar en sus características geométricas, las cuales aparecen representadas en la Figura 96.

Collector name from library	
<input type="text" value="Solargenix SGX-1"/>	<input type="button" value="Apply Values from Library"/>

Collector Geometry	
Reflective aperture area	<input type="text" value="470.3"/> m <sup>2</sup>
Aperture width, total structure	<input type="text" value="5"/> m
Length of collector assembly	<input type="text" value="100"/> m
Number of modules per assembly	<input type="text" value="12"/>
Average surface-to-focus path length	<input type="text" value="1.8"/> m
Piping distance between assemblies	<input type="text" value="1"/> m

Figura 96. Características geométricas del colector solar Solargenix. Fuente: SAM.

El receptor solar con el que se ha realizado la simulación es el Schott PTR70, las características geométricas de su tubo absorbedor aparecen en la

Receiver Geometry	
Absorber tube inner diameter	<input type="text" value="0.066"/> m
Absorber tube outer diameter	<input type="text" value="0.07"/> m
Glass envelope inner diameter	<input type="text" value="0.115"/> m
Glass envelope outer diameter	<input type="text" value="0.12"/> m
Absorber flow plug diameter	<input type="text" value="0"/> m
Internal surface roughness	<input type="text" value="4.5e-005"/>
Absorber flow pattern	<input type="button" value="Tube flow"/>
Absorber material type	<input type="button" value="304L"/>

Así pues, haciendo uso de las Ecuación 25 y Ecuación 26 se deduce un volumen de acero de:

$$l_d = 207 \cdot 4 \cdot 100 = 82800 \text{ m}$$

$$V_e = (0,07^2 - 0,066^2) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 82800 = 35,38 \text{ m}^3$$

Este volumen podrá estar conformado por acero de un tipo u otro y así dependerá, por tanto, su masa. Es aquí, donde se introduce la suposición de que el volumen de acero será de las tipologías a estudiar en la presente tesis doctoral. El circuito primario soporta altas temperaturas, por ello, para esta parte de la instalación, se evaluarán los aceros P92 y 316. Haciendo uso de la Ecuación 31 se obtienen las masas de P92 y de 316.

Teniendo en cuenta la Ecuación 27 se obtiene un Volumen de HTF:

$$V_i = 0,066^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 82800 = 283,27 \text{ m}^3$$

La masa de este volumen dependerá de si se trata de Therminol, sal binaria o sal Hitec, ya que tiene diferentes propiedades fisicoquímicas.

Haciendo uso de la Tabla 63. Densidades [kg/m3] de materiales bajo estudio. y la Ecuación 31 se obtienen las masas de los tres HTF a estudiar.

La siguiente tabla expresa las cantidades de aceros, sales y aceite térmico.

	<b>masa, [kg]</b>
T92	222426
316	283040
Binaria a 550° C	492946,45
Hitec a 550° C	475015,46
Therminol a 340°C	219477,60

Tabla 68. masas [kg] de materiales bajo estudio.

El tubo absorbedor estará construido en un acero y lo recorrerá una determinada sal. Las combinaciones posibles son:

<b>ACERO</b>	<b>HTF</b>
P92	Sal binaria
P92	Sal Hitec
P92	Therminol
316	Sal binaria
316	Sal Hitec
316	Therminol

Tabla 69. Posibilidades de combinación de material del absorbedor y fluido de transferencia de calor (HTF). Central 150 MW. Fuente: Elaboración propia.

### 6.5.3.3. Conducciones y sistema de intercambio.

Los componentes que forman parte de una central termosolar no se escalan linealmente sino que según Pihl, E. et al siguen la siguiente relación<sup>284</sup>(Ecuación 34).

$$m = m' \left( \frac{P}{P'} \right)^{0,89}$$

Ecuación 34

Donde:

m masa, [kg]

m' masa de la planta de referencia, [kg].

P Potencia de la planta a escalar [MW].

P' Potencia de la planta de referencia, [MW].

Se toma como referencia la planta solar Andasol I, cilindro-parabólica de concentración, con almacenamiento térmico con sales fundidas de 7,5h. Se asumen las mismas cantidades de acero para el modelo de central de 50MW desarrollado en la presente tesis doctoral, tal como se ha desarrollado anteriormente y se escala para la planta de 150 MW siguiendo la Ecuación 34

Las cantidades de acero de referencia son (Tabla 70):

	Masa de referencia en planta de 50 MW	Masa en planta de 150 MW	Tipo de acero
<b>Conducciones</b>	107986 kg	287081,6 kg	P92/316
<b>Intercambio</b>	57000 kg	151534,93 kg	

Tabla 70. Cantidades de acero implicadas en la planta termosolar de 150 MW, obtenidas a partir de una planta de referencia de 50 MW.

<sup>284</sup> Pihl, E., Kushnir, D., Sandén, B., & Johnsson, F. (2012). *Material constraints for concentrating solar thermal power*. Energy, 44(1), 944-954.

#### 6.5.3.4. Tanques.

La manera de proceder para conocer el volumen de los tanques de acero, es la misma que para la central de 50 MW. La modelización en SAM de la planta, permite conocer una serie de parámetros básicos para poder determinar dos cosas: la cantidad de sales que se requieren y la cantidad de acero implicado en cada tanque de almacenamiento.

A continuación se presenta la secuencia de desarrollo.

Los parámetros generales que se encuentran en la central que se está analizando, es decir, una de 150 MW de potencia, se pueden apreciar en la Figura 97. Se han introducido los datos requeridos tales como almacenamiento térmico de 12h, para lo cual el propio sistema indica, en base a las características de la planta en cuestión, las dimensiones de los tanques y las características técnicas de su operación, tal como temperatura de operación mínima (238°C, en el caso de 150MW con sal Hitec), temperatura de operación máxima (593°C, en el caso de 150MW con sal Hitec). La densidad del fluido, su calor específico, la eficiencia de almacenamiento exérgica, el coeficiente de pérdidas, los puntos de temperatura de ajuste, etc.

Full load hours of TES	12 hr	Tank heater capacity	25 MWht
Storage volume	62303 m <sup>3</sup>	Tank heater efficiency	0.98
TES Thermal capacity	4769.48 MWht	Hot side HX approach temp	5 °C
Parallel tank pairs	1	Cold side HX approach temp	5 °C
Tank height	20 m	Thermal storage exergetic efficiency	1.000
Tank fluid min height	1 m	Initial TES fluid temp	300 °C
Tank diameter	62.9788 m	Storage HTF fluid	Hitec Solar Salt
Min fluid volume	3115.15 m <sup>3</sup>	User-defined HTF fluid	Edit...
Tank loss coeff	0.4 W/m <sup>2</sup> -K	Storage HTF min operating temp	238 °C
Estimated heat loss	0.910903 MWt	Storage HTF max operating temp	593 °C
Cold tank heater set point	250 °C	Fluid temperature	342 °C
Hot tank heater set point	365 °C	TES fluid density	1872.49 kg/m <sup>3</sup>
		TES specific heat	1.50182 kJ/kg-K

Figura 97. Parámetros generales del Sistema de almacenamiento térmico de la central de 150MW. Fuente: Modelado en SAM.

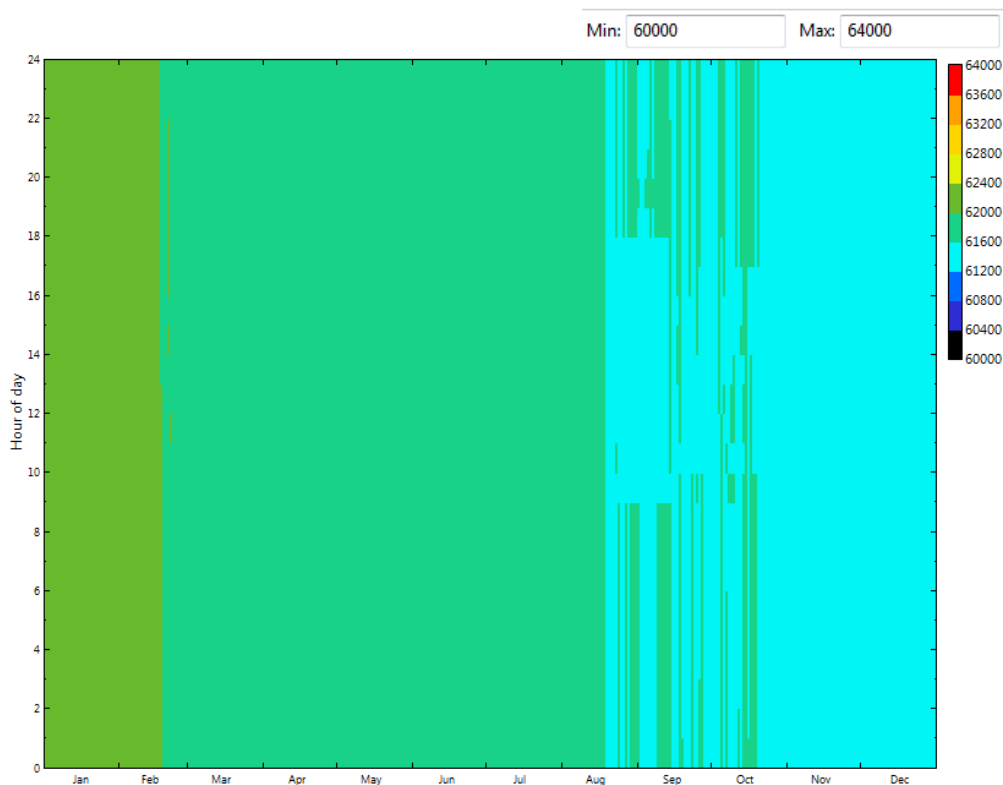


Figura 98 .TES volumen total ( $\text{m}^3$ ).Relación entre el volumen en el tanque, y los meses y franja horaria.  
Volumen total. Fuente: Modelado en SAM.

Se ha realizado la modelización en SAM y se han obtenido numerosos resultados. En la Figura 98, se presenta un gráfico que aporta información sobre el almacenamiento térmico total, es decir, la suma de los tanques. En él se tiene que el almacenamiento total mínimo es de  $60.000 \text{ m}^3$  y el máximo de  $64.000 \text{ m}^3$ . Se aprecia que en los meses más cálidos el almacenamiento es inferior, subiendo el mismo en los meses de septiembre a diciembre y siendo en enero y febrero cuando se requiere de mayor acumulación.

Tras analizar el almacenamiento total, se obtienen las secuencias para el tanque frío y el caliente individualmente. Esto queda reflejado en la Figura 99 (tanque frío) y Figura 100 (tanque caliente). En ellas se pueden comprobar las fluctuaciones horarias que sufren los tanques. Durante la noche el tanque de almacenamiento térmico cede su calor para producir energía, así pues, desciende su volumen pasándolo al tanque de sales fías, durante el día, ese volumen inferior que está en el tanque caliente verá incrementar su volumen poco a poco, por el paso del tanque frío al caliente, de las sales, y se irá incrementando su temperatura para, así volver al ciclo. Por ello, durante las horas

centrales del día el tanque caliente tiene menos volumen que en la noche, y viceversa con el frío.

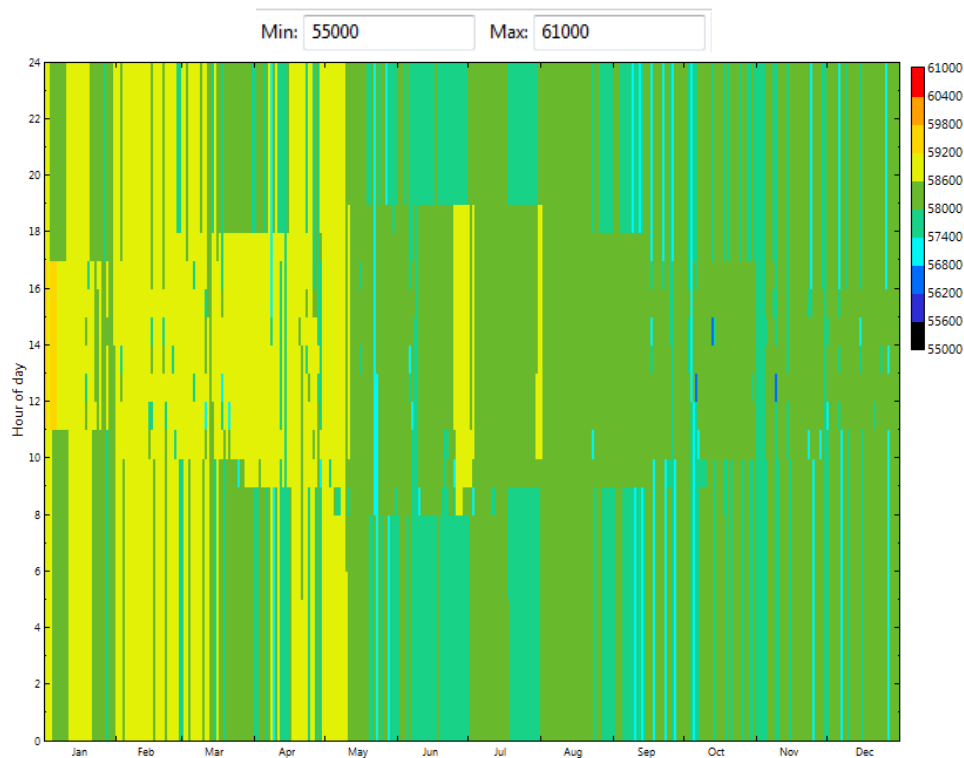


Figura 99. TES volumen total ( $m^3$ ).Relación entre el volumen en el tanque, y los meses y franja horaria.

Tanque frío. Fuente: Modelado en SAM.

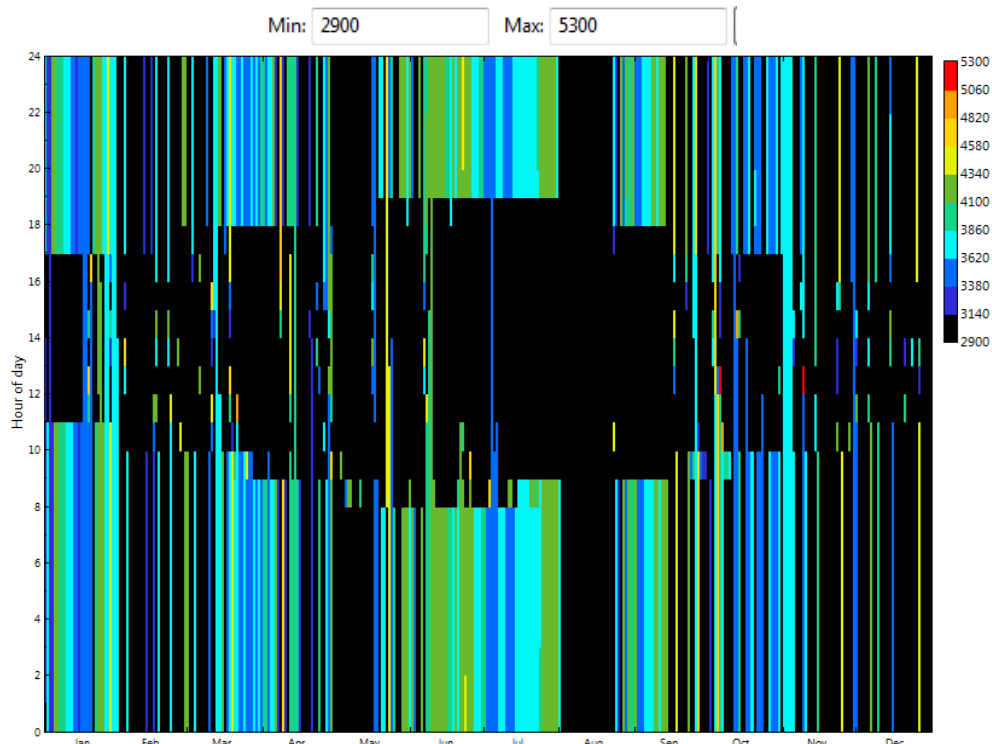


Figura 100. TES volumen total ( $m^3$ ).Relación entre el volumen en el tanque, y los meses y franja horaria.

Tanque caliente. Fuente: Modelado en SAM.



La Figura 101, representa, para cada serie, 8760 valores, uno día de un año completo, el volumen medio de acumulación en el tanque por día. Así pues, se tiene que de media, los volúmenes de sales fundidas en los tanques de almacenamiento son:

- TANQUE CALIENTE: 3402,335732 m<sup>3</sup>
- TANQUE FRÍO: 58337,23008 m<sup>3</sup>

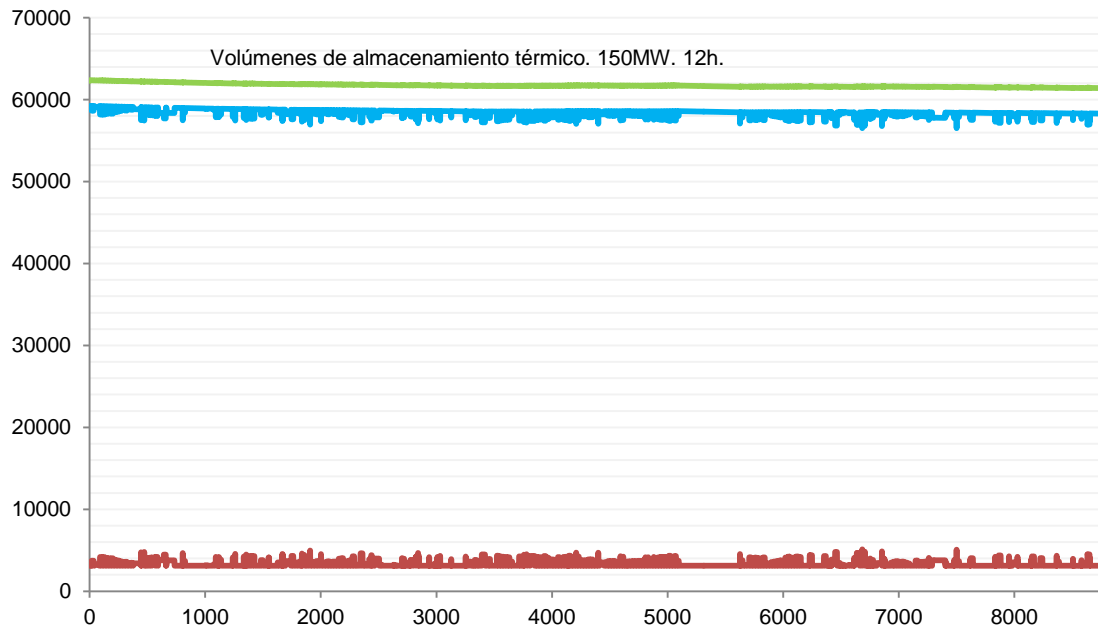


Figura 101. Volumen (m<sup>3</sup>) de los tanques de almacenamiento. Frío, en azul. Caliente, en rojo. Suma de ambos, verde. Fuente: Elaboración propia con datos de la simulación en SAM.

Así pues, con todo lo anterior, se sigue el procedimiento establecido en el modelo de 50MW y se para obtener masa de acero de los tanques de almacenamiento como continúa.

Con el volumen máximo de sales, se construye el de los tanques.

Con el volumen máximo de los tanques (FRÍO: 61.000 m<sup>3</sup>, CALIENTE: 5.300 m<sup>3</sup>, ver Figura 99 y Figura 100), se construye el volumen de los tanques y así se obtienen el peso de los aceros.

Con el volumen máximo de sales, se construye el volumen de los tanques.

Para el caso de 150MW, los volúmenes máximos de sales en los tanques frío y caliente son  $61.000 \text{ m}^3$  y  $5.300 \text{ m}^3$  respectivamente.

Del mismo modo que en el caso de 50 MW, se toma un volumen cilíndrico como arquitectura de todos los depósitos. Al igual que el espesor de la lámina de acero que se encuentra en contacto con las sales será de  $6\text{mm}^{285}$ , siguiendo las recomendaciones de la Norma API 650.

Se fija una altura para los depósitos de 20 m y se hace uso de la Ecuación 32 y la Ecuación 33.

Con ello, se llegan a los resultados de radios de tanque y volumen de acero, para el tanque frío y caliente, siguientes:

	Tanque frío	Tanque caliente
$V_i$	$61000 \text{ m}^3$	$5300 \text{ m}^3$
$e$	0,006 m	0,006 m
$h$	20 m	20 m
$r_{\text{tanque}}$	31,16 m	9,18 m
$V_a$	$60,09 \text{ m}^3$	$10,106 \text{ m}^3$

Tabla 71. Características geométricas de los tanques del modelo de 50MW, así como los volúmenes de acero que los conforman.

La masa de acero, según la Ecuación 31, dependerá del tipo de acero utilizado. Se presentan los detalles en la tabla a continuación.

El volumen medio de las sales de cada tanque, viene dado por la simulación en SAM. Con este volumen, las densidades pertinentes (obtenidas con Ecuación 28 y Ecuación 29) y la Ecuación 31, se obtienen las masas de sales que se estudiarán.

<sup>285</sup> Standard, A. P. I. (2007). *650, Welded steel tanks for oil storage*. American Petroleum Institute.

		Tanque caliente		Tanque frío	
ACEROS	Tipo de acero	P92	316	A516	T22
	$\rho$ densidad, [kg/m <sup>3</sup> ].	7700	8000	78500	77600
	m masa, [kg].	77.807,19	80838,64	4717290,38	4663206,80
SALES	Volumen sales [m <sup>3</sup> ]	3402,33		19401,97	
	Temperatura sales [°C]	550		290	
	$\rho$ densidad Hitec, [kg/m <sup>3</sup> ]	1676,86		1867,29	
	$\rho$ densidad Binaria, [kg/m <sup>3</sup> ]	1740,20		1905,56	
	m masa Hitec, [kg].	5705250,222		108932339,7	
	m masa Binaria, [kg].	5920744,641		111165092,2	

Tabla 72. Resultados en kg de acero y sales. Modelo 150 MW. Estos formarán parte del inventario de ACV.

#### **6.5.4. Inventario de Ciclo de Vida para 50 MW y 150 MW.**

A continuación se presenta una recopilación en tabla de lo recogido en los últimos apartados. Como se ha comentado con anterioridad, a partir de SAM y referencias bibliográficas se ha conseguido elaborar un Inventario de Ciclo de vida de los aceros y fluidos de transferencia y/o almacenamiento de calor implicados en una central termosolar con tecnología cilindro-parabólica de 50 MW y otra de 150 MW, ambas con la misma ubicación, en Sevilla.

Se proponen varias composiciones de los modelos de centrales para poder obtener unas conclusiones claras con respecto a los materiales que son más ventajosos en lo que a materia de sostenibilidad se refiere. Se analizarán todas las opciones y se aportarán conclusiones sobre la mejor o peor selección de materiales y cómo esto puede repercutir en un aumento o descenso de los impactos ambientales.

Se ha creado una estructura en cuatro partes, básicamente, de las centrales. Estas son:

- Colectores de acero específica y HTF que circula por los mismos
- Conducciones
- Almacenamiento frío de sales en tanque de acero específico
- Almacenamiento caliente de sales en tanque de acero específico

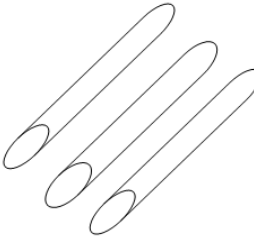
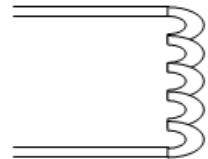
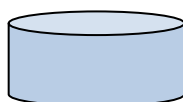
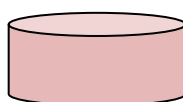
			50 MW	150 MW
	ACERO	P92	90798,4	222426
	MÓDULOS	316	94320,0	283040
	HTF	Binaria	164318,4	492946,45
	CIRCULANTES	Hitec	158337,8	475015,46
	POR MÓDULOS	Therminol	73160,5	219477,60
	CONDUCCIONES Y SISTEMA DE INTERCAMBIO	P92	106986	287081,6
			57000	151534,93
		316	106986	287081,6
			57000	151534,93
	SALES FRÍAS	Binaria	36.971.612,56	111165092,2
		Hitec	36.229037,19	108932339,7
	ACERO TANQUE FRÍO	516	2.255.889,6	4717290,38
		T22	2.230.025,89	4663206,80
	SALES	Binaria	1.946.845,26	5920744,641
	CALIENTES	Hitec	1.875.986,90	5705250,222
	ACERO TANQUE CALIENTE	P92	37451,84	77.807,19
		316	38911,01	80838,64

Tabla 73. Inventario de Ciclo de Vida de las centrales de 50 MW y 150 MW respectivamente, para el sistema Receptor-HTF-Intercambio-Acumulación-TES. Resultados expuestos en kg. Fuente: Elaboración propia.

## 6.6. Resultados para el modelo de 50 MW.

Aplicaciones calientes	HTF	Aplicaciones frías	Fluido de almacenamiento	Nombre en gráficas
P92	Therminol	T22	Hitec	50 MW Therminol-P92-T22-HiTec
P92	Hitec	T22	Hitec	50 MW P92-T22-HiTec
P92	Therminol	T22	Binaria	50 MW Therminol-P92-T22-Binaria
P92	Binaria	T22	Binaria	50 MW P92-T22-Binaria
P92	Therminol	A516	Hitec	50 MW Therminol-P92-A516-HiTec
P92	Hitec	A516	Hitec	50 MW P92-A516-HiTec
P92	Therminol	A516	Binaria	50 MW Therminol-P92-A516-Binaria
P92	Binaria	A516	Binaria	50 MW P92-A516-Binaria
316	Therminol	T22	Hitec	50 MW Therminol-316-T22-HiTec
316	Hitec	T22	Hitec	50 MW 316-T22-HiTec
316	Therminol	T22	Binaria	50 MW Therminol-316-T22-Binaria
316	Binaria	T22	Binaria	50 MW 316-T22-Binaria
316	Therminol	A516	Hitec	50 MW Therminol-316-A516-HiTec
316	Hitec	A516	Hitec	50 MW 316-A516-HiTec
316	Therminol	A516	Binaria	50 MW Therminol-316-A516-Binaria
316	Binaria	A516	Binaria	50 MW 316-A516-Binaria

Tabla 74. Sistemas posibles para la central de 50 MW según los materiales.

Tal y como se aprecia en la Tabla 74, existen 16 posibilidades para el conjunto que se estudia en cada una de las centrales. Como se ha venido describiendo a lo largo de toda la tesis, se trata de los tubos absorbedores, el fluido de transferencia de calor (HTF), las conducciones e intercambio y los tanques de almacenamiento, con sus volúmenes de sal incluidos.

En este apartado, se muestran los resultados numéricos correspondientes a los resultados de la evaluación de impacto, son todas sus categorías. Posteriormente se grafican para tener una visión más esquemática de los acontecimientos y se analizan los mismos.

La Tabla 75 recoge los resultados de caracterización de todas las posibles combinaciones de las centrales de 50MW. En ella se aprecian las categorías: Agotamiento recursos abióticos, Agotamiento recursos abióticos (combustibles fósiles), Cambio Climático, Agotamiento capa de ozono, Toxicidad Humana, Ecotoxicidad terrestre, Oxidación fotoquímica, Acidificación, Eutrofización, propias del método utilizado, CML.

La Figura 102 presenta la caracterización de cada central completa en función de la combinación de materiales elegida. En esta gráfica se marcan las opciones más favorables en verde y las más desfavorables en rojo.

Así pues, en la caracterización de las centrales, se aprecia cómo los sistemas que mejoran la mayoría de las categorías son:

- El sistema indirecto formado por el HTF Therminol, con el acero P92 formando parte de las aplicaciones caliente el A516 en las frías, con una acumulación de sales fundidas de la tipología Hitec.
- El sistema directo con el acero P92 formando parte de las aplicaciones caliente el A516 en las frías y sales fundidas Hitec como fluido caloportador y almacenamiento térmico.

Existen un par de sistemas que se aprecia claramente que son los menos favorables, ya que presentan los impactos más elevados en el global de las categorías. Estos son:

- El sistema indirecto formado por el HTF Therminol, con el acero 316 formando parte de las aplicaciones caliente el T22 en las frías, con una acumulación de sales fundidas de la tipología Binaria.
- El sistema directo con el acero 316 formando parte de las aplicaciones caliente el T22 en las frías y sal fundida binaria como fluido caloportador y almacenamiento térmico.

El agotamiento de los recursos abióticos, agotamiento de los recursos abióticos (combustibles fósiles), toxicidad humana, formación de oxidación fotoquímica y eutrofización, son categorías que presentan el comportamiento explicado, se marca en verde las composiciones más favorables con el medioambiente y en rojo las más desfavorables, siendo éstos sistemas los descrito anteriormente.

El agotamiento del ozono estratosférico no corresponde con este comportamiento. En este caso las categorías marcadas como más respetuosas con el medio ambiente, no se corresponden, así pues, se aprecia que el uso de sal binaria frente a la Hitec, en esta categoría es determinante. Las combinaciones que llevan sal binaria resultan las más favorecidas en el ámbito del agotamiento del ozono estratosférico. Así pues, se puede concluir que el uso de sal binaria, mejora esta categoría.

En la categoría de ecotoxicidad terrestre, los sistemas marcados en verde, y seleccionados como aquellos que presentan un mejor comportamiento medioambiental de manera global, no lo hacen en esta categoría. Sucede igual que en el impacto anterior (ozono estratosférico). Siendo la sal binara una opción más favorable si de ecotoxicidad terrestre se trata. Se puede comprobar en apartados anteriores, en la Figura 76, que justo estas dos categorías son las que, unitariamente, obtienen mejores resultados para la binaria al compararse entre ellas, la sal solar binaria y la Hitec. Por lo que, y en base a los resultados unitarios, los resultados arrojados por el conjunto de las centrales cobran congruencia.

En la categoría acidificación, se aprecia cómo los sistemas marcados en verde no son los más favorables, sino los segundos más favorables, y los que se marcan en rojo tampoco son los más desfavorables sino los segundos más desfavorables. Ello es debido a que en acidificación, tal como se pudo apreciar en la parte de los análisis unitarios, el A516 resulta menos impactante que el T22.

Por todo ello se aprecia la coherencia entre los resultados unitarios y los generales. Y se eligen las propuestas previamente explicadas.



	Agotamiento recursos abióticos	Agotamiento recursos abióticos (combustibles fósiles)	Cambio Climático	Agotamiento capa de ozono	Toxicidad Humana	Ecotoxicidad terrestre	Oxidación fotoquímica	Acidificación	Eutrofización
	kg Sb eq	MJ	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg C2H4 eq	kg SO2 eq	kg PO4--- eq
50 MW Therminol-P92-T22-HiTec	1395,1765	1,16E+09	1,18E+08	10,888991	1,02E+08	64128,267	23197,157	632369,27	371496,05
50 MW Therminol-P92-T22-Binaria	1541,9126	1,18E+09	1,63E+08	4,4473739	1,09E+08	58012,268	23828,407	704245,71	514922,55
50 MW Therminol-P92-A516-HiTec	754,93548	1,14E+09	1,16E+08	10,795825	48222673	58404,875	23111,33	638118,91	230104,37
50 MW Therminol-P92-A516-Binaria	901,67161	1,16E+09	1,61E+08	4,3542083	55431990	52288,876	23742,58	709995,35	373530,88
50 MW Therminol-316-T22-HiTec	1633,1257	1,17E+09	1,19E+08	10,953076	1,21E+08	71081,073	25412,094	692842	419720,39
50 MW Therminol-316-T22-Binaria	1779,8618	1,20E+09	1,64E+08	4,5114596	1,28E+08	64965,074	26043,344	764718,43	563146,89
50 MW Therminol-316-A516-Hitec	992,88468	1,15E+09	1,17E+08	10,859911	67522459	65357,681	25326,267	698591,64	278328,71
50 MW Therminol-316-A516-Binaria	1139,6208	1,18E+09	1,62E+08	4,418294	74731776	59241,683	25957,517	770468,07	421755,22
50 MW P92-T22-HiTec	1393,1292	1,15E+09	1,17E+08	10,801933	97877119	63748,32	22767,993	622272,47	369610,52
50 MW P92-T22-Binaria	1540,5227	1,18E+09	1,62E+08	4,3338186	1,05E+08	57609,971	23403,238	694491,06	513655,36
50 MW P92-A516-HiTec	752,88817	1,13E+09	1,16E+08	10,708767	44248077	58024,928	22682,166	628022,1	228218,84
50 MW P92-A516-Binaria	900,28169	1,16E+09	1,61E+08	4,2406531	51489813	51886,58	23317,411	700240,71	372263,68
50 MW 316-T22-HiTec	1631,0783	1,16E+09	1,18E+08	10,866019	1,17E+08	70701,127	24982,931	682745,19	417834,85
50 MW 316-T22-Binaria	1778,4719	1,19E+09	1,64E+08	4,3979044	1,24E+08	64562,777	25618,176	754963,79	561879,69
50 MW 316-A516-HiTec	990,83736	1,14E+09	1,17E+08	10,772853	63547863	64977,735	24897,104	688494,83	276443,18
50 MW 316-A516-Binaria	1138,2309	1,17E+09	1,62E+08	4,3047388	70789599	58839,386	25532,349	760713,43	420488,02

Tabla 75. Resultados de caracterización de las centrales de 50MW con todas las posibles combinaciones.

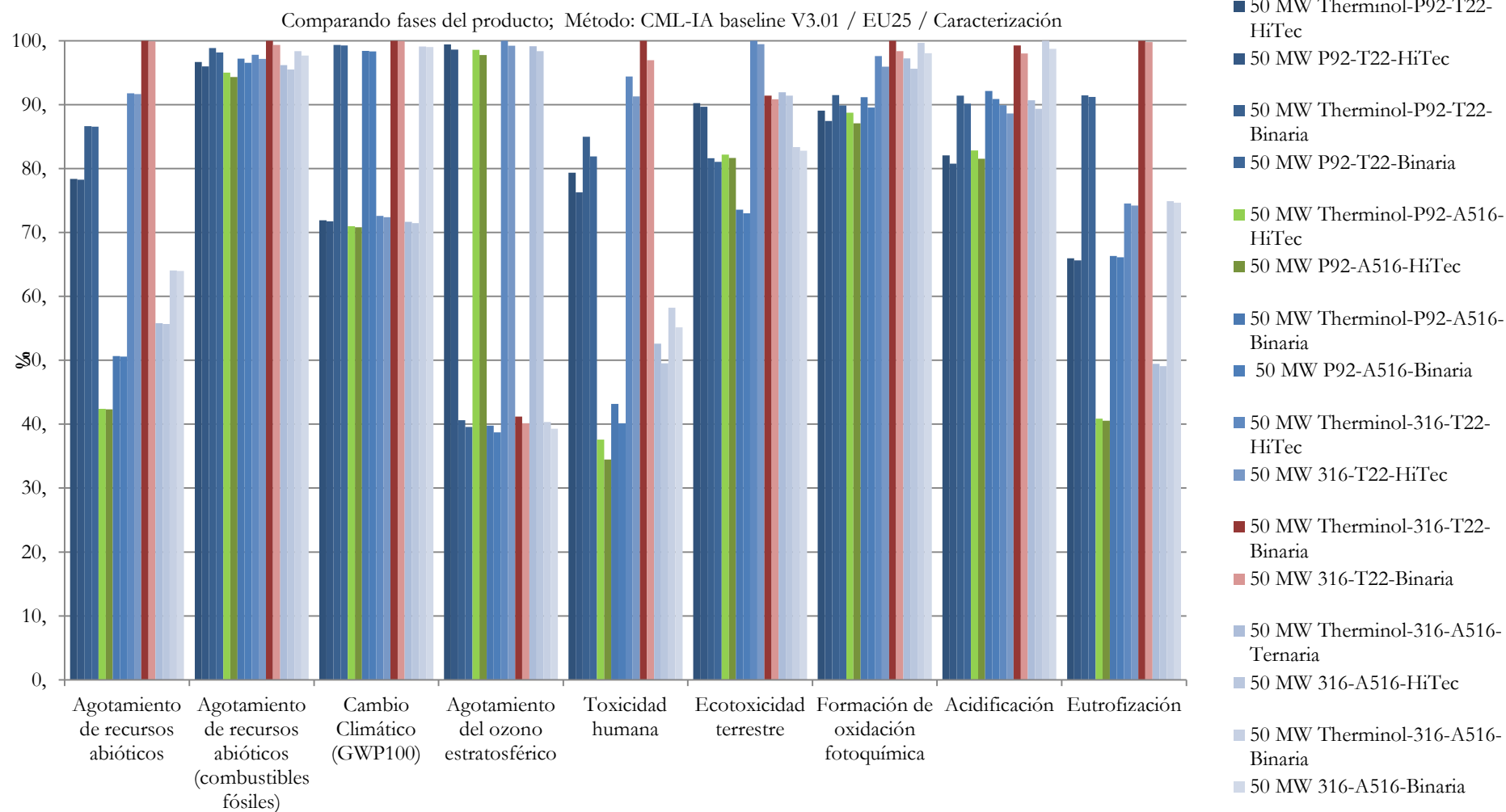


Figura 102. Caracterización de las centrales 50MW. Marcando las opciones más favorables (verde) y las menos favorables (rojo).

	Agotamiento recursos abióticos	Agotamiento recursos abióticos (combustibles fósiles)	Cambio Climático (GWP100a)	Agotamiento capa de ozono	Toxicidad Humana	Ecotoxicidad terrestre	Oxidación fotoquímica	Acidificación	Eutrofización
50 MW Therminol-P92-T22-HiTec	1,65E-05	3,68E-05	2,34E-05	1,22E-07	1,31E-05	1,32E-06	2,74E-06	2,24E-05	2,82E-05
50 MW Therminol-P92-T22-Binaria	1,82E-05	3,77E-05	3,24E-05	4,98E-08	1,41E-05	1,20E-06	2,81E-06	2,50E-05	3,90E-05
50 MW Therminol-P92-A516-HiTec	8,91E-06	3,62E-05	2,31E-05	1,21E-07	6,22E-06	1,20E-06	2,73E-06	2,27E-05	1,74E-05
50 MW Therminol-P92-A516-Binaria	1,06E-05	3,70E-05	3,21E-05	4,88E-08	7,15E-06	1,08E-06	2,80E-06	2,52E-05	2,83E-05
50 MW Therminol-316-T22-HiTec	1,93E-05	3,73E-05	2,36E-05	1,23E-07	1,56E-05	1,46E-06	3,00E-06	2,46E-05	3,18E-05
50 MW Therminol-316-T22-Binaria	2,10E-05	3,81E-05	3,26E-05	5,05E-08	1,66E-05	1,34E-06	3,07E-06	2,71E-05	4,27E-05
50 MW Therminol-316-A516-Hitec	1,17E-05	3,66E-05	2,33E-05	1,22E-07	8,71E-06	1,35E-06	2,99E-06	2,48E-05	2,11E-05
50 MW Therminol-316-A516-Binaria	1,34E-05	3,75E-05	3,23E-05	4,95E-08	9,64E-06	1,22E-06	3,06E-06	2,74E-05	3,20E-05
50 MW P92-T22-HiTec	1,64E-05	3,66E-05	2,34E-05	1,21E-07	1,26E-05	1,31E-06	2,69E-06	2,21E-05	2,80E-05
50 MW P92-T22-Binaria	1,82E-05	3,74E-05	3,23E-05	4,85E-08	1,36E-05	1,19E-06	2,76E-06	2,47E-05	3,89E-05
50 MW P92-A516-HiTec	8,88E-06	3,59E-05	2,31E-05	1,20E-07	5,71E-06	1,20E-06	2,68E-06	2,23E-05	1,73E-05
50 MW P92-A516-Binaria	1,06E-05	3,68E-05	3,20E-05	4,75E-08	6,64E-06	1,07E-06	2,75E-06	2,49E-05	2,82E-05
50 MW 316-T22-HiTec	1,92E-05	3,70E-05	2,36E-05	1,22E-07	1,51E-05	1,46E-06	2,95E-06	2,42E-05	3,17E-05
50 MW 316-T22-Binaria	2,10E-05	3,79E-05	3,26E-05	4,93E-08	1,61E-05	1,33E-06	3,02E-06	2,68E-05	4,26E-05
50 MW 316-A516-HiTec	1,17E-05	3,64E-05	2,33E-05	1,21E-07	8,20E-06	1,34E-06	2,94E-06	2,44E-05	2,10E-05
50 MW 316-A516-Binaria	1,34E-05	3,72E-05	3,23E-05	4,82E-08	9,13E-06	1,21E-06	3,01E-06	2,70E-05	3,19E-05

Tabla 76. Resultados de normalización de las centrales de 50MW con todas las posibles combinaciones.

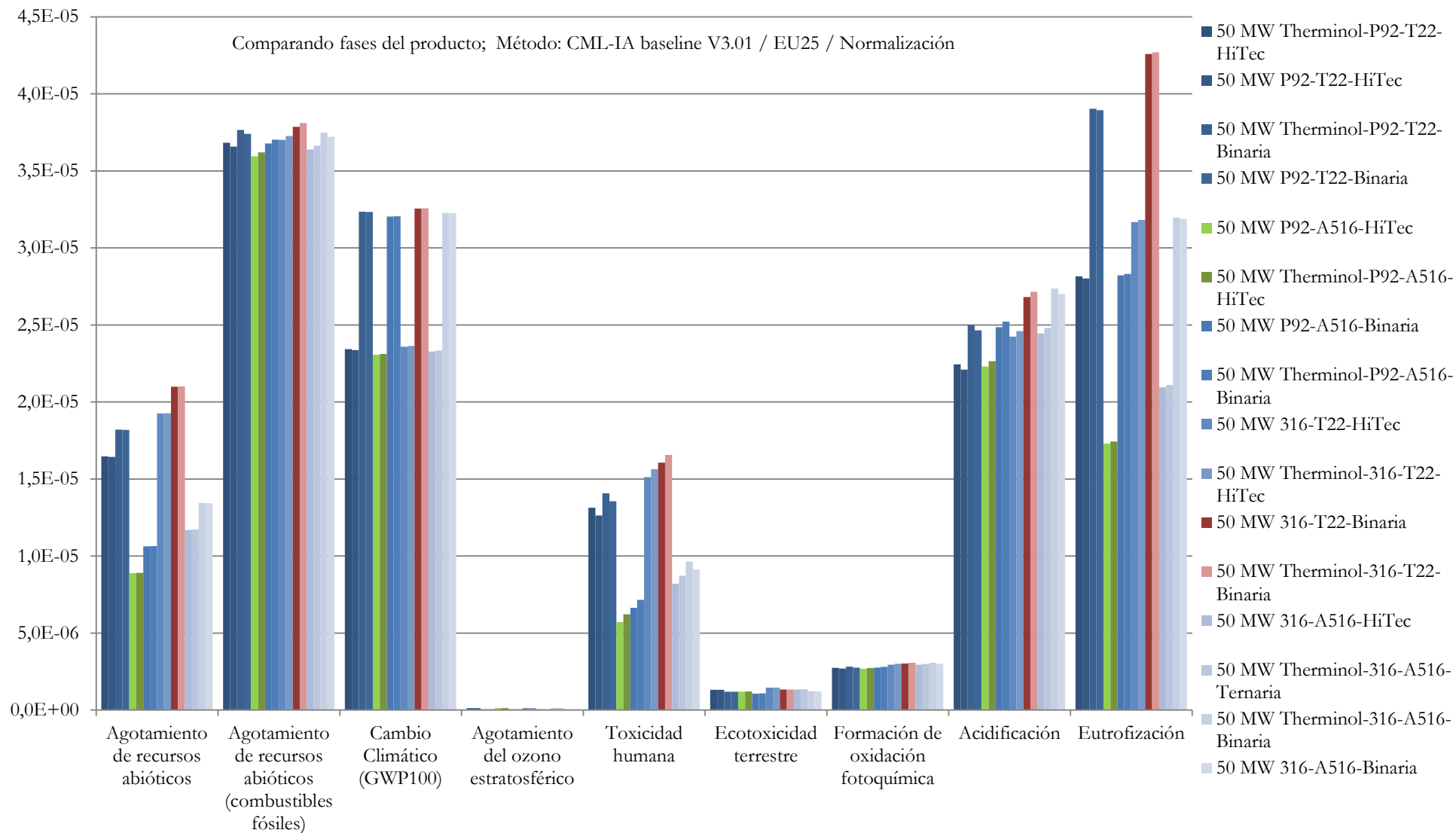


Figura 103. Normalización de las centrales 50MW. Marcando las opciones más favorables (verde) y las menos favorables (rojo).

En la Figura 103, se muestra la normalización de las centrales de 50 MW. En ella se puede observar cómo el agotamiento del ozono estratosférico es una categoría en la que apenas se tiene impacto sobre el medioambiente, en ninguna de las 16 versiones posibles de modelo de central.

Ecotoxicidad terrestre no presenta el mayor problema medioambiental, ya que se tienen unos impactos prácticamente despreciables en comparación con lo que aportan otras categorías.

Otra de las apreciaciones destacables es que en el agotamiento de los recursos abióticos (combustibles fósiles) no se aprecian grandes diferencias en el hecho de sustituir un material por otro todas las opciones tienen un impacto, en este sentido, considerable y además de un orden de magnitud similar. Si bien es cierto, las composiciones marcadas en verde, presentan un comportamiento mejorado de las versiones marcadas en rojo.

Agotamiento recursos abióticos (combustibles fósiles): viene marcado por el alto contenido en las sales. Es la peor categoría para sales, así pues es la peor categoría analizándola globalmente.

En eutrofización, la diferencia entre seleccionar el uno de los sistemas verdes a uno de los sistemas rojos es de más del doble de impacto. Con ello se aprecia que no es lo mismo realizar una elección u otra de materiales. La influencia del acero 316 en esta categoría, sumada al uso de sal binaria multiplica los efectos con respecto a la categoría con Hitec y P92.

El Cambio climático es la segunda categoría más dañina para las sales cuando se analizan estas desde un punto de vista unitario, así pues, aquí se ve que también lo es para la general.

En eutrofización se tiene que, unitariamente, para las sales es la cuarta categoría, para aceros la primera. En este caso, marca la tendencia los aceros. Y es la peor categoría para el peor acero, apareciendo los repuntes en aquellas con 316.

Para el caso de agotamiento de recursos abióticos: las sales no impactan en esta categoría notablemente, por eso es una categoría marcada por los aceros. Los picos aparecen en aquellas composiciones con 316-T22.

### 6.6.1. Sistema directo o sistema indirecto.

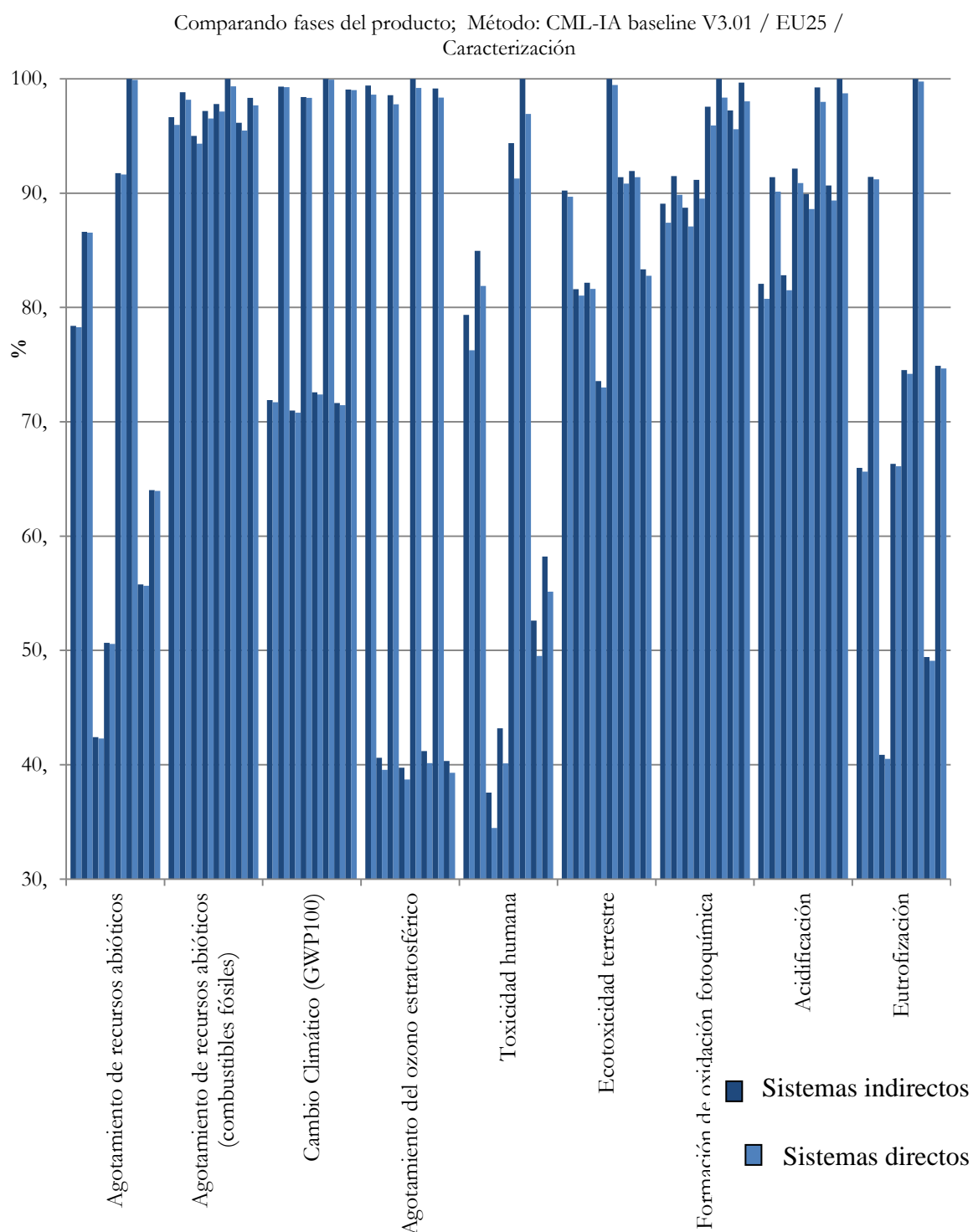


Figura 104. Caracterización de la central de 50MW, marcando los sistemas indirectos (claro) e indirectos (oscuro), para proceder al análisis de los mismos.

Se ha obtenido una gráfica con la mismas 16 modelizaciones pero solo marcando la diferencia entre sistema directo o sistema indirecto.

Ya se apreció en los apartados correspondientes al análisis unitario, que el aceite térmico era mucho más impactante en todas las categorías que cualquiera de las sales consideradas, por ello, y siguiendo con aquella tendencia, se aprecia que en el caso de los sistemas indirectos siempre obtienen un resultado más dañino para el medio ambiente.

Todo esto aparece reflejado en la Figura 76 , viéndose que los casos con el aceite térmico Therminol resultan más impactantes que sus homólogos con las sales.

### **6.6.2. Análisis de las partes consideradas.**

No solo se precisa conocer aquellos sistemas que son globalmente más sostenibles sino que también se ha considerado relevante el análisis de las partes que componen la instalación, por ello, se ha dividido cada modelización en subsistemas. El subsistema de captación es el formado por un HTF que será Therminol en los sistemas directos y alguna de las dos sales estudiadas, en los sistemas indirectos. En las gráficas este sistema es el que se refiere a “colectores”. Se tiene otro subsistema de conducciones y sistema de intercambio, y por último, dos más, tanque frío y tanque caliente, compuestos ambos por el acero y la sal de turno.

En las Figura 105 y Figura 106 se tiene la caracterización y normalización (respectivamente) de estas partes. Lo primero que se aprecia al examinarlas es que el subsistema de los tanques fríos es el que más significancia tiene para todas las categorías y en todas sus posibles combinaciones, seguido de los subsistemas de tanque caliente.

En el subsistema de colectores, aquellos con aceite térmico aportan peores resultados y en el global, las contribuciones del subsistema conducciones e intercambio son apenas perceptibles frente a, por ejemplo, los tanques de almacenamiento.

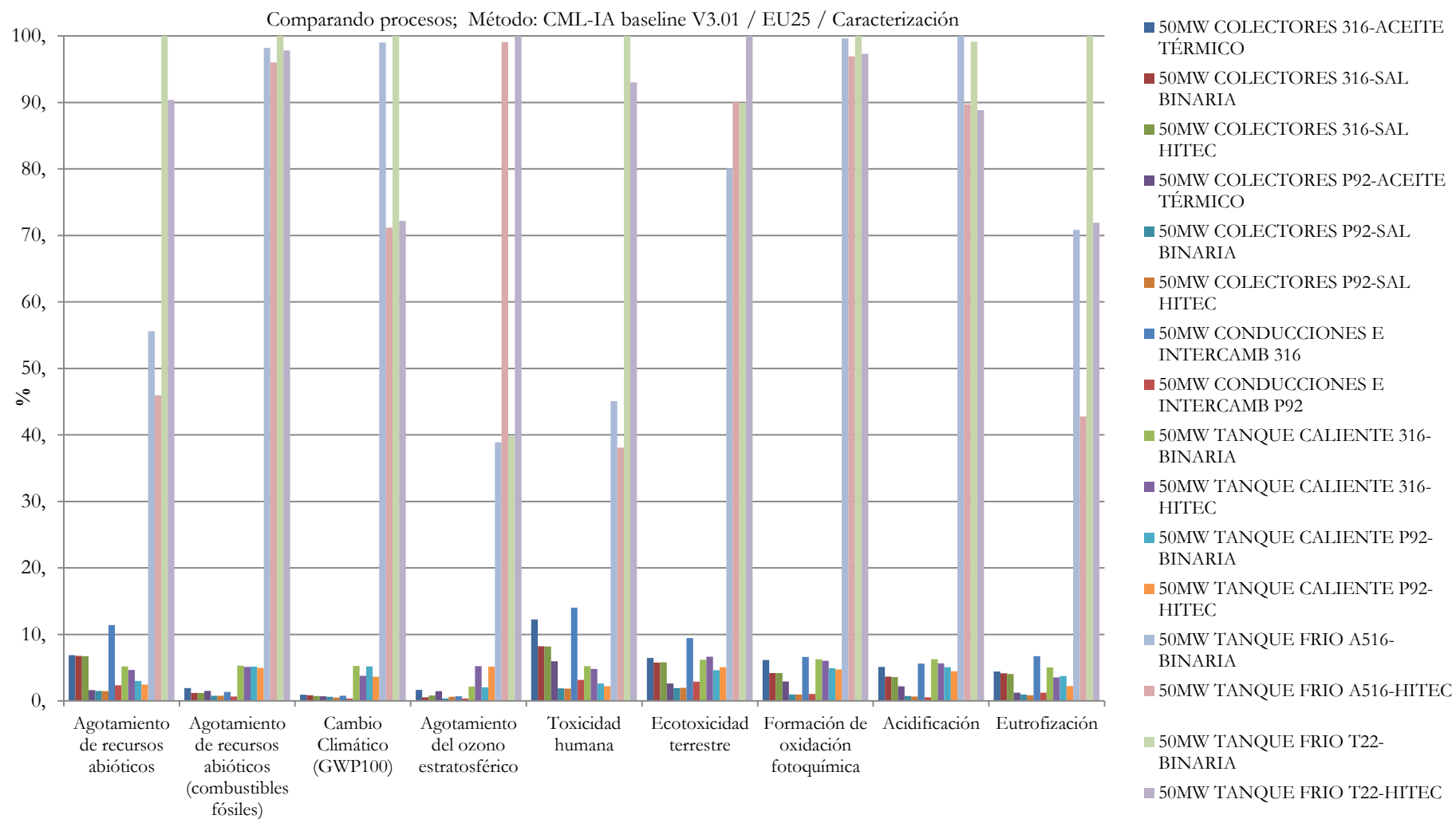


Figura 105. Caracterización de las partes involucradas en las diferentes posibilidades de modelo de central CCP de 50 MW.



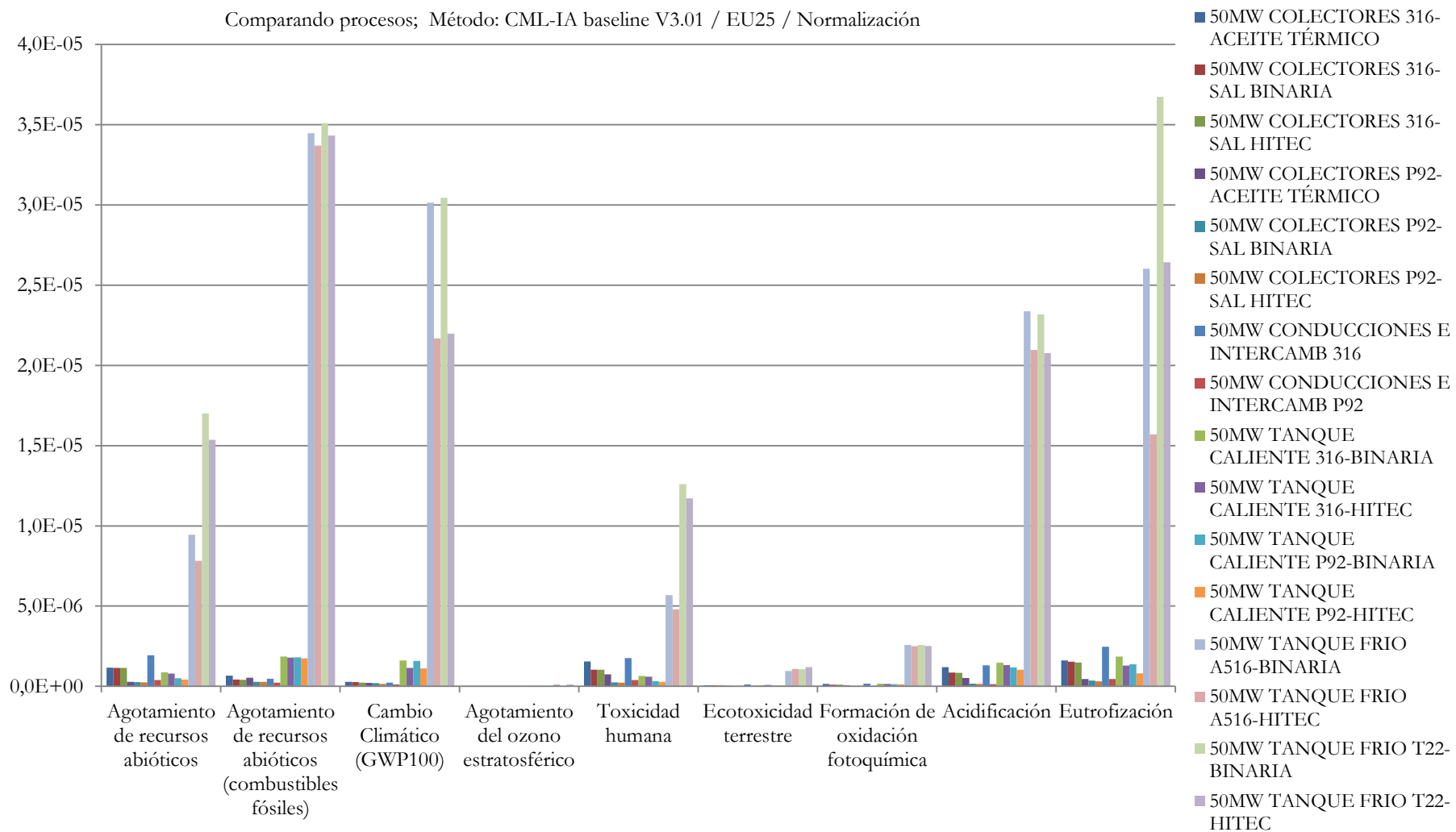


Figura 106. Normalización de las partes involucradas en las diferentes posibilidades de modelo de central CCP de 50 MW

### 6.6.3. Resultados detallados para la propuesta más favorable y menos favorable en materia de sostenibilidad.

Con motivo de tener una visión sobre cómo y cuánto varía la elección entre una propuesta y otra, se presenta una comparativa entre el conjunto más favorable y el más desfavorable, no aporta novedades en cuanto a los impactos pero sí a una visualización y dalle de sus partes (Figura 107).

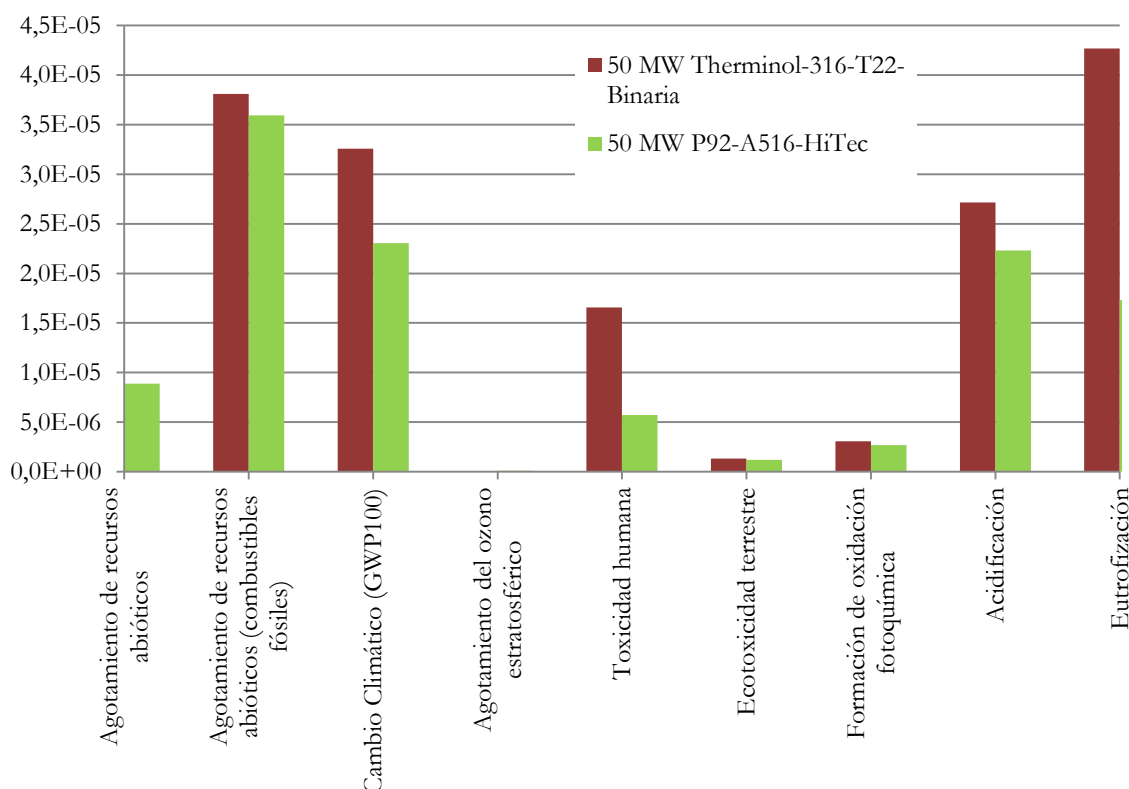


Figura 107. ACV comparativo entre opción más favorable y opción más desfavorable en el caso de las centrales de 50MW. Normalización.

En ambos casos (Figura 108 y Figura 109) se aprecia como el cuerpo de todos los impactos y el que tiene mayor peso en ellos es siempre el tanque frío. El tanque caliente tiene menos aporte (por tener menor cantidad de sales). En el caso del tanque caliente, en el caso que lleva sal solar binaria, se puede apreciar cómo su contribución es más significativa que en el caso con Hitec.

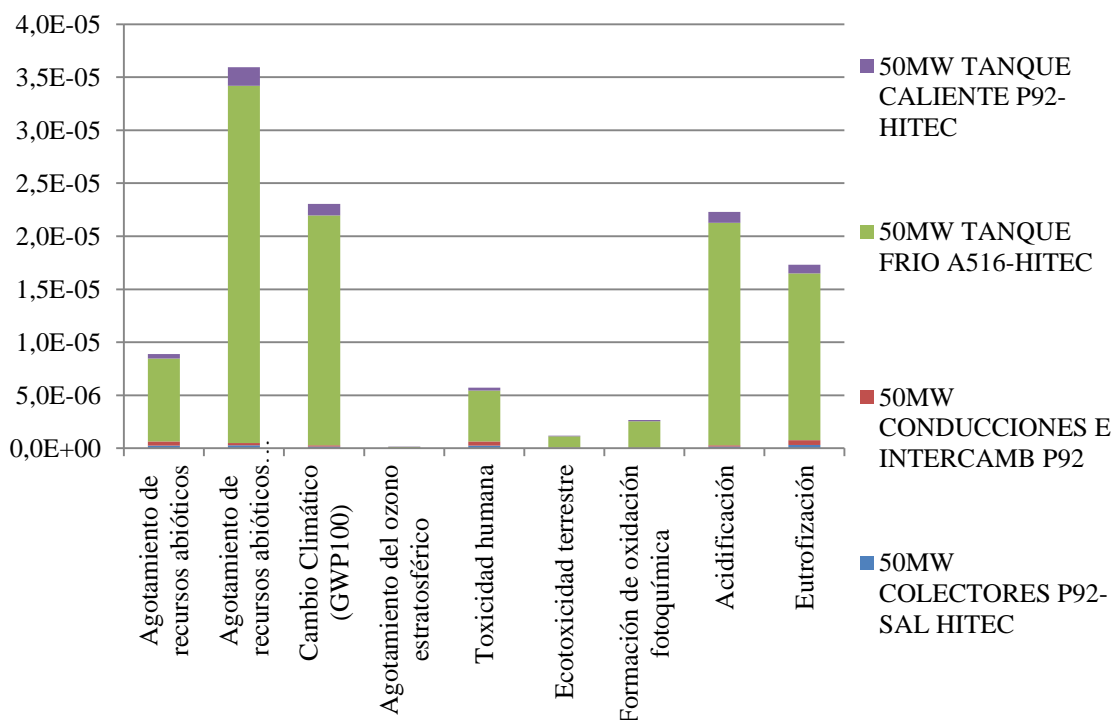


Figura 108. ACV detallando las partes implicadas. Opción más favorable. Sistema directo, hitec, P29, A516.Normalización.

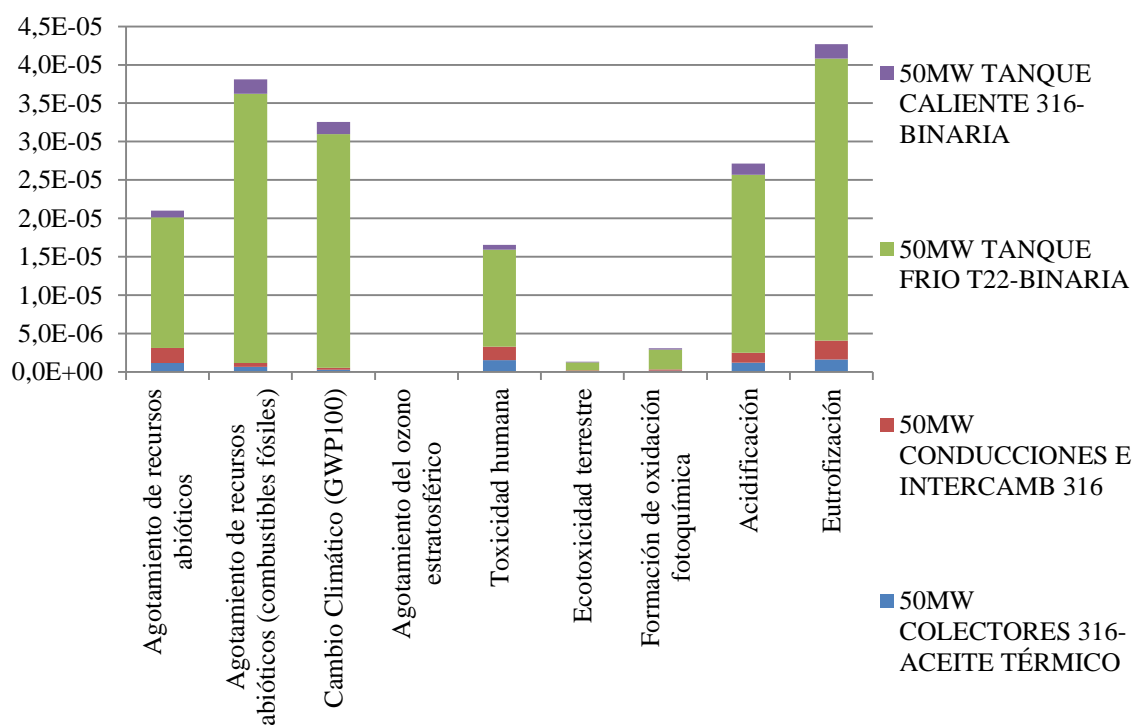


Figura 109. ACV detallando las partes implicadas. Opción más desfavorable. Sistema indirecto, aceite térmico, binaria, 316, T22.Normalización.

Conociendo que todos los materiales seleccionados cumplen con las características técnicas necesarias para formar parte de una central termosolar cilindro-parabólica con almacenamiento térmico, la elección basada, además, en criterios de sostenibilidad diría que se tiene:

- SISTEMA MÁS FAVORABLE: El sistema directo con el acero P92 formando parte de las aplicaciones caliente el A516 en las frías y sales fundidas Hitec como fluido caloportador y almacenamiento térmico.
- SISTEMA MÁS DESFAVORABLE: El sistema indirecto formado por el HTF Therminol, con el acero 316 formando parte de las aplicaciones caliente el T22 en las frías, con una acumulación de sales fundidas de la tipología Binaria.

Teniendo por tanto claro el principal descarte (aceite Therminol, sal binaria, aceros T22 y 316) y una clara elección, que es el sistema directo con acumulación y HTF con sal Hitec y aplicaciones con aceros P92 y A516.

## **6.7. Resultados para el modelo de 150 MW.**

El modelo de 150 es completamente análogo al de 50MW. Los impactos más significativos en la central de 50 MW, lo son también en esta. Las posibilidades estudiadas son las mismas y tan solo se diferencian en las cantidades de material, que como se ha visto a la hora de desarrollar el inventario, son significativamente superiores.

Es por ello que en este apartado se incluirán las gráficas y datos numéricos, del mismo modo que en el caso de 50MW. Para no resultar repetitivo, no se realizará explicación pormenorizada de los impactos. Como se viene diciendo es igual que en 50 MW. La significancia de este apartado consiste en la caracterización de dicha potencia de 150 MW. Se traduce el inventario de materiales a impactos medioambientales y se cuantifica, ello se encuentra en la Tabla 77.

Se tiene también la gráfica de caracterización, y la normalización en forma gráfica y tabulada.

Gracias a que se ha caracterizado esta central de 150 MW, se obtendrán en un apartado posterior, conclusiones sobre la relación entre materiales y potencia instalada.

A continuación, se presentan las tablas y gráficas citadas y se invita a analizar sus resultados basándose en aquellos obtenidos en 50MW.

<b>Categoría de impacto</b>	Agotamiento de recursos abióticos	Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	Cambio Climático (GWP100)	Agotamiento del ozono estratosférico	Toxicidad humana	Ecotoxicidad terrestre	Formación de oxidación fotoquímica	Acidificación	Eutrofización
Unidad	kg Sb eq	MJ	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg C2H4 eq	kg SO2 eq	kg PO4---eq
150 MW Therminol-P92-T22-HiTec	3467,6479	3,42E+09	3,49E+08	32,523708	2,46E+08	183610,37	67410,472	1867701,5	959315,31
150 MW Therminol-P92-T22-Binaria	3909,1177	3,50E+09	4,84E+08	13,144446	2,68E+08	165211,86	69310,125	2083956,9	1390817,9
150 MW Therminol-P92-A516-HiTec	2128,8401	3,38E+09	3,46E+08	32,328889	1,34E+08	171642,19	67230,999	1879724,6	663651,19
150 MW Therminol-P92-A516-Binaria	2570,3098	3,46E+09	4,81E+08	12,949627	1,56E+08	153243,68	69130,652	2095980	1095153,8
150 MW Therminol-316-T22-HiTec	4120,4857	3,46E+09	3,52E+08	32,707422	2,99E+08	202893,75	73461,262	2032075,6	1091373,4
150 MW Therminol-316-T22-Binaria	4561,9555	3,54E+09	4,87E+08	13,32816	3,21E+08	184495,24	75360,914	2248331	1522875,9
150 MW Therminol-316-A516-HiTec	2781,6779	3,42E+09	3,49E+08	32,512603	1,87E+08	190925,57	73281,788	2044098,6	795709,25
150 MW Therminol-316-A516-Binaria	3223,1477	3,50E+09	4,84E+08	13,133341	2,09E+08	172527,06	75181,441	2260354	1227211,8
150 MW P92-T22-HiTec	3455,149	3,39E+09	3,47E+08	32,145038	2,34E+08	181887,55	65899,708	1830915,2	951514,52
150 MW P92-T22-Binaria	3904,948	3,48E+09	4,84E+08	12,803786	2,56E+08	164004,99	68034,642	2054693,5	1387016,4
150 MW P92-A516-HiTec	2116,3411	3,35E+09	3,44E+08	31,950219	1,22E+08	169919,37	65720,235	1842938,2	655850,4
150 MW P92-A516-Binaria	2566,1402	3,44E+09	4,81E+08	12,608968	1,44E+08	152036,81	67855,17	2066716,6	1091352,3
150 MW 316-T22-HiTec	4107,9868	3,43E+09	3,50E+08	32,328752	2,87E+08	201170,94	71950,497	1995289,2	1083572,6
150 MW 316-T22-Binaria	4557,7858	3,52E+09	4,87E+08	12,9875	3,09E+08	183288,37	74085,432	2219067,6	1519074,4
150 MW 316-A516-HiTec	2769,179	3,39E+09	3,47E+08	32,133933	1,75E+08	189202,75	71771,025	2007312,3	787908,47
150 MW 316-A516-Binaria	3218,978	3,48E+09	4,84E+08	12,792682	1,97E+08	171320,19	73905,959	2231090,6	1223410,3

Tabla 77. Resultados de caracterización de las centrales de 150MW con todas las posibles combinaciones.

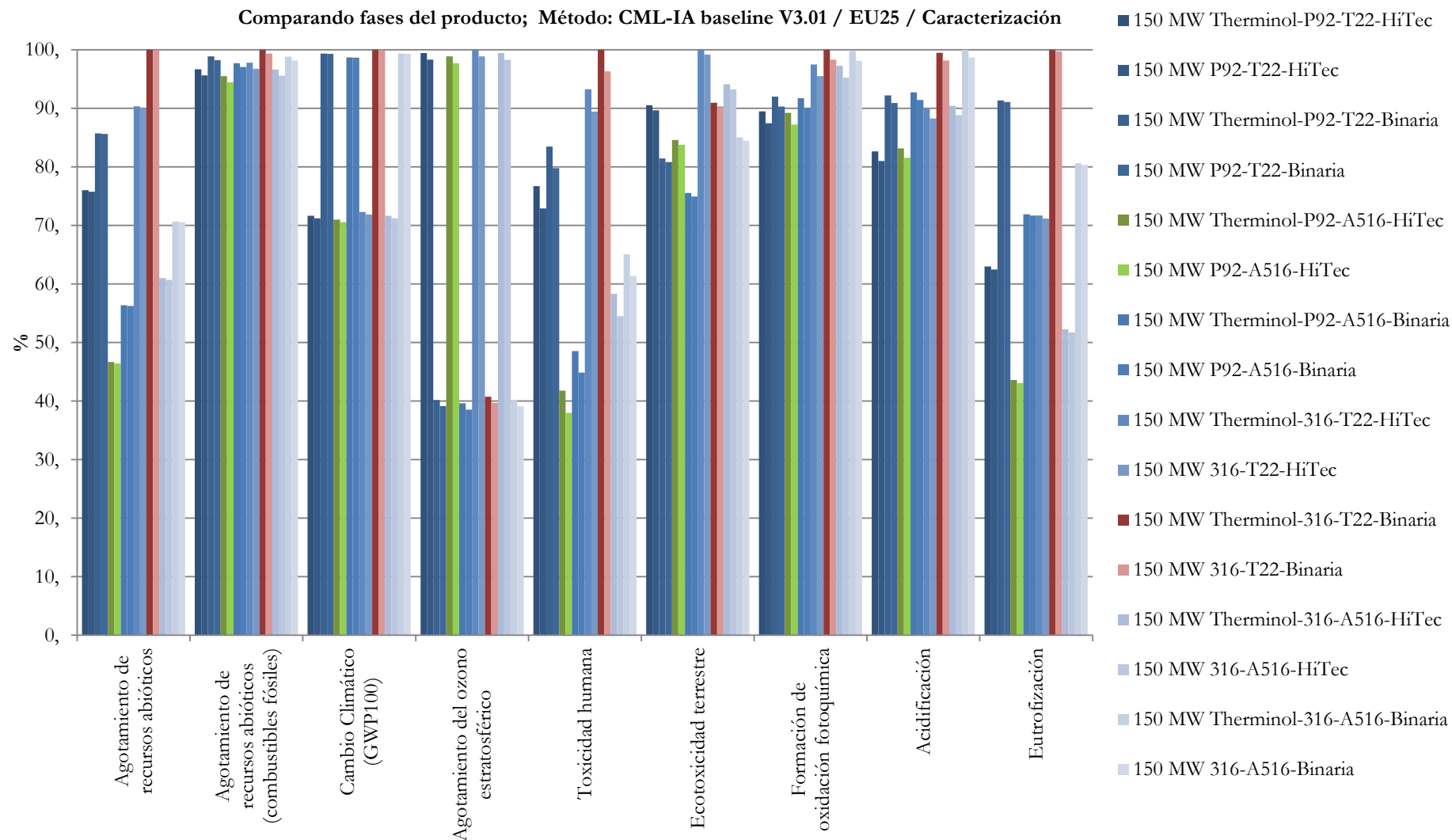


Figura 110. Caracterización de la central de 150MW con sus 16 posibles combinaciones. Caracterización.

<b>Categoría de impacto</b>	Agotamiento de recursos abióticos	Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	Cambio Climático (GWP100)	Agotamiento del ozono estratosférico	Toxicidad humana	Ecotoxicidad terrestre	Formación de oxidación fotoquímica	Acidificación	Eutrofización
150 MW Therminol-P92-T22-HiTec	4,09E-05	0,00010888	6,95E-05	3,64E-07	3,18E-05	3,78E-06	7,95E-06	6,63E-05	7,27E-05
150 MW Therminol-P92-T22-Binaria	4,61E-05	0,0001114	9,64E-05	1,47E-07	3,46E-05	3,40E-06	8,18E-06	7,40E-05	0,00010542
150 MW Therminol-P92-A516-HiTec	2,51E-05	0,00010757	6,88E-05	3,62E-07	1,73E-05	3,54E-06	7,93E-06	6,67E-05	5,03E-05
150 MW Therminol-P92-A516-Binaria	3,03E-05	0,00011008	9,57E-05	1,45E-07	2,01E-05	3,16E-06	8,16E-06	7,44E-05	8,30E-05
150 MW Therminol-316-T22-HiTec	4,86E-05	0,00011015	7,01E-05	3,66E-07	3,86E-05	4,18E-06	8,67E-06	7,21E-05	8,27E-05
150 MW Therminol-316-T22-Binaria	5,38E-05	0,00011266	9,70E-05	1,49E-07	4,14E-05	3,80E-06	8,89E-06	7,98E-05	0,00011543
150 MW Therminol-316-A516-HiTec	3,28E-05	0,00010884	6,95E-05	3,64E-07	2,41E-05	3,93E-06	8,65E-06	7,26E-05	6,03E-05
150 MW Therminol-316-A516-Binaria	3,80E-05	0,00011135	9,63E-05	1,47E-07	2,69E-05	3,55E-06	8,87E-06	8,02E-05	9,30E-05
150 MW P92-T22-HiTec	4,08E-05	0,00010773	6,90E-05	3,60E-07	3,02E-05	3,75E-06	7,78E-06	6,50E-05	7,21E-05
150 MW P92-T22-Binaria	4,61E-05	0,00011064	9,63E-05	1,43E-07	3,30E-05	3,38E-06	8,03E-06	7,29E-05	0,00010514
150 MW P92-A516-HiTec	2,50E-05	0,00010642	6,84E-05	3,58E-07	1,57E-05	3,50E-06	7,75E-06	6,54E-05	4,97E-05
150 MW P92-A516-Binaria	3,03E-05	0,00010933	9,57E-05	1,41E-07	1,86E-05	3,13E-06	8,01E-06	7,34E-05	8,27E-05
150 MW 316-T22-HiTec	4,85E-05	0,00010899	6,97E-05	3,62E-07	3,70E-05	4,14E-06	8,49E-06	7,08E-05	8,21E-05
150 MW 316-T22-Binaria	5,38E-05	0,0001119	9,69E-05	1,45E-07	3,99E-05	3,78E-06	8,74E-06	7,88E-05	0,00011515
150 MW 316-A516-HiTec	3,27E-05	0,00010768	6,90E-05	3,60E-07	2,26E-05	3,90E-06	8,47E-06	7,13E-05	5,97E-05
150 MW 316-A516-Binaria	3,80E-05	0,00011059	9,63E-05	1,43E-07	2,54E-05	3,53E-06	8,72E-06	7,92E-05	9,27E-05

Tabla 78. Resultados de normalización de las centrales de 150MW con todas las posibles combinaciones.



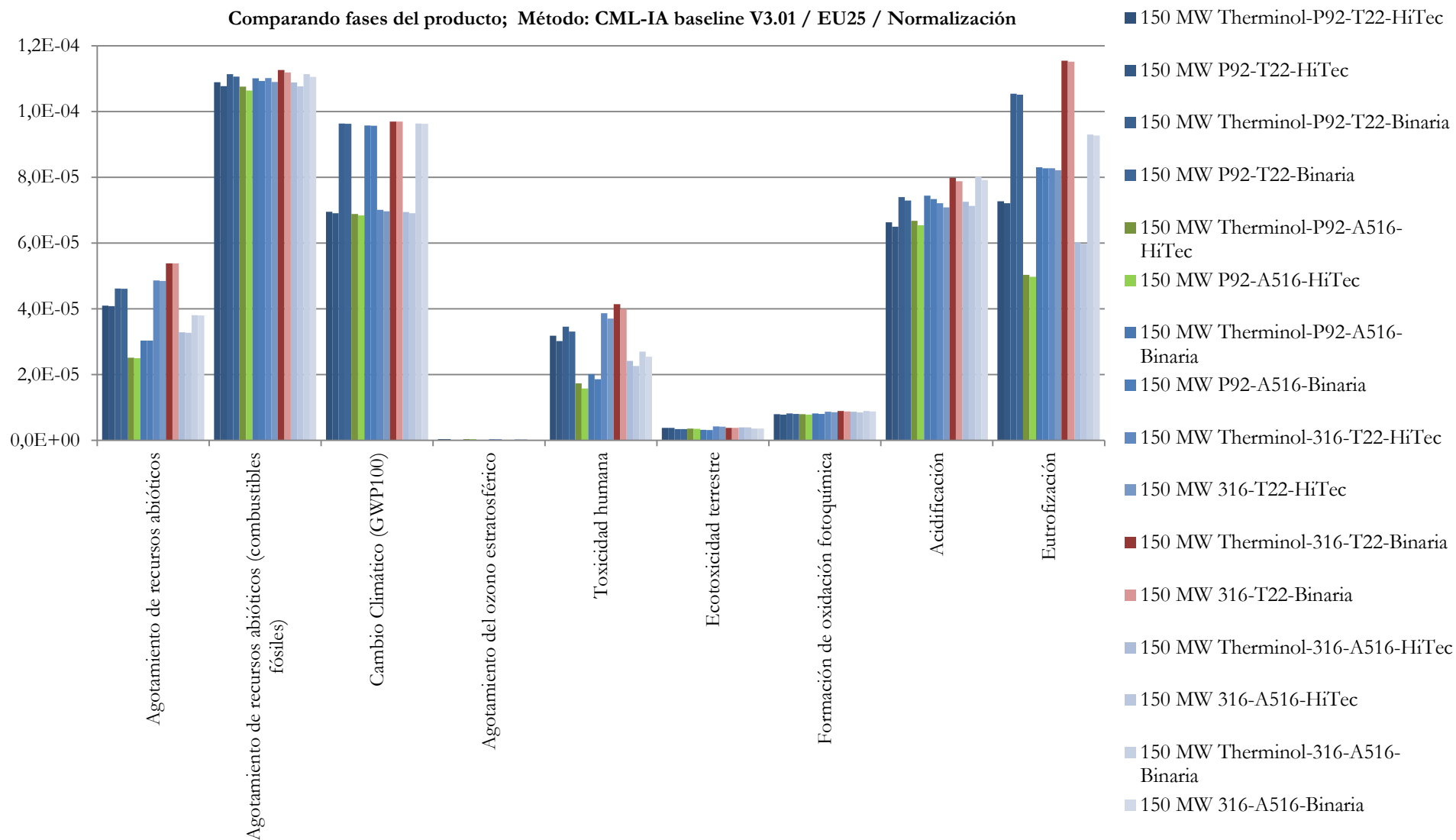


Figura 111. Caracterización de la central de 150MW con sus 16 posibles combinaciones. Normalización.

## 6.8. Análisis de la relación potencia instalada-impacto medioambiental.

		150 LINEAL	150 REAL	%
Agotamiento de recursos abióticos	<i>kg Sb eq</i>	3799,61801	3341,23064	12,06%
Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles)	<i>MJ</i>	3492688650	3447730056	1,29%
Cambio Climático (GWP100)	<i>kg CO2 eq</i>	419505548	416022273	0,83%
Agotamiento del ozono estratosférico	<i>kg CFC-11 eq</i>	22,8104673	22,6486921	0,71%
Toxicidad humana	<i>kg 1,4-DB eq</i>	258937654	221569141	14,43%
Ecotoxicidad terrestre	<i>kg 1,4-DB eq</i>	184468,241	177336,293	3,87%
Formación de oxidación fotoquímica	<i>kg C2H4 eq</i>	73091,262	70599,3951	3,41%
Acidificación	<i>kg SO2 eq</i>	2089367,43	2047515,34	2,00%
Eutrofización	<i>kg PO4--- eq</i>	1187512,35	1090363	8,18%

Tabla 79. Análisis de la relación entre impactos y potencias de una central termosolar cilindro-parabólica.

Con el objetivo de conocer cómo influyen los impactos en el escalado de centrales, se realiza este apartado.

Lo primero de todo fue conocer los impactos medioambientales que resultan del uso de aceros y fluidos de transferencia de calor en centrales de dos potencias diferentes; esto se ha visto en apartados anteriores.

Con los impactos de los 16 sistemas de las centrales termosolares cilindro-parabólicas de 50 MW, se hizo una media de todos ellos y el resultado se multiplicó por tres. Es lo que se coloca en la primera columna de la Tabla 79, indicando que si los resultados fueran lineales, se tendría esta aproximación. Dicha aproximación (llamada 150 lineal), se compara con los impactos reales de la media de las 16 combinaciones de centrales de 150 MW (que es lo referido en la columna, 150 real). Se estudian las diferencias y los resultados son:

La categoría cambio climático presenta una relación prácticamente lineal entre impactos medioambientales y potencia, pues la desviación entre ello es solo del 0,83%. Esto mismo es extrapolable a la categoría, agotamiento del ozono estratosférico, con tan solo una desviación del 0,71%

Las categorías Acidificación, Formación de oxidación fotoquímica, Agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles) y Ecotoxicidad terrestre tienen desviaciones de menos del 4%, por lo que si se hiciera una extrapolación entre impactos y potencia lineal en ellas, se puede decir que se asumiría un error prudencial.

Las categorías Agotamiento de recursos abióticos, Toxicidad humana, Eutrofización presentan unas desviaciones superiores al 8%, por lo que se puede afirmar que en estas categorías la relación impacto potencia no es lineal y habría que recurrir a otros métodos y/o realizar ACVs completos y detallados si se parte de los datos de una central con una potencia dada y se quiere conocer los que se tienen en otra de potencia conocida.

## 6.9. Evaluación de aspectos económicos.

El desarrollo sostenible está centrado en la interconexión de tres componentes. La componente social, la componente ecológica y la componente económica. Si es social y ecológico, se puede decir que es soportable; si es ecológico y económico, entonces será viable; cuando es económico y social, es equitativo. Y en el momento que conectan las tres, siendo, económico, social y ecológico, entonces es sostenible.

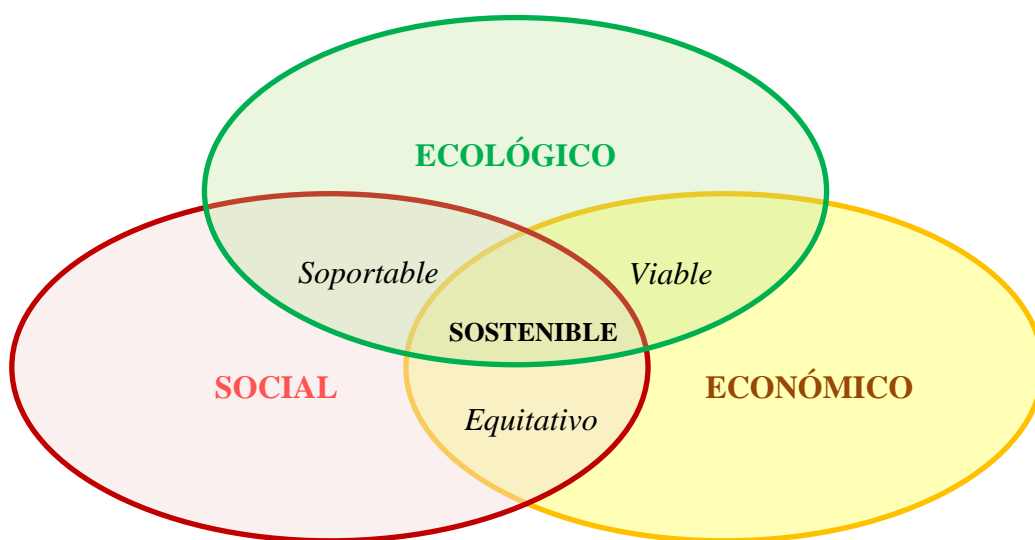


Figura 112. Principios del desarrollo sostenible.

Se han expuesto en el Capítulo 3 las ventajas sociales que suponen las energías renovables, que se pueden resumir en:

- El hecho de ser una herramienta para reducir las consecuencias del cambio climático, visto no solo desde el punto de vista medioambiental sino social por reducir consecuencias desastrosas en las sociedades modernas.
- Ser motor económico de naciones, evitando la dependencia de combustibles fósiles. Aportando, por su carácter autóctono, seguridad energética a los países que apuestan por ellas.
- Tener capacidad para garantizar el acceso a la energía a la población mundial.

Posteriormente, como parte fundamental y central del presente trabajo de investigación, se han evaluado las consecuencias medioambientales del uso de aceros, sales fundidas y aceite térmico, obteniendo sus impactos mediante la técnica de ACV. Se obtuvieron tanto de manera individual como enmarcados en el seno de una central termosolar de concentración cilindro-parabólica.

Completando el conjunto, se aporta a continuación una valoración económica de los materiales estudiados para tener la visión completa.

Además, la técnica de Análisis de Ciclo de Vida, se encuentra, actualmente complementada por el ACV social, el cual evalúa parámetros tales como horas de trabajo asociadas a los procesos productivos, cantidad de trabajo infantil, etc. Por otro lado, en continua expansión, se encuentra el ACV económico (LCC, Life Cycle Costing, por sus siglas en inglés). Con ello se puede valorar la optimización de la compensación entre etapas para resultar en el costo mínimo del ciclo de vida del producto. El ACV económico se desarrolla de la misma forma que el convencional, sencillamente, en este caso, los factores de caracterización utilizados serán del tipo monetario como, por ejemplo, €/kg. Estas nuevas herramientas nacen con el objetivo de valorar no solo la componente medioambiental de los procesos y productos sino también las otras dos ramas del desarrollo sostenible.

### 6.9.1. Aceros.

Se parte de la consideración que se expresa en la Tabla 80, resultado de obtener precios por kg de acero, provenientes de proveedores a nivel industrial.

ACERO	PRECIO €/kg
316	3
P92	2
T22	0,5
A516	0,45

Tabla 80. Relación de costes en €/kg de acero.

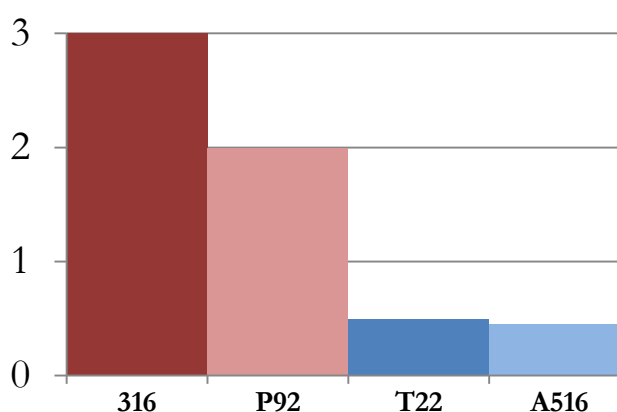


Figura 113. Costes en €/kg de acero.

El coste refleja que se tiene un mayor precio cuanto más aleado se encuentra el acero, es decir, más cromo y níquel tiene. Así, el más económico es el acero al carbono (A516), seguido del ligeramente aleado (T22), aumentando significativamente en el caso del ferrítico con mayor cantidad de Cr (P92) y teniendo el valor más elevado en el inoxidable el 316.

De la obtención de los impactos medioambientales, se obtuvo que para las aplicaciones calientes la opción menos impactante y, por tanto, recomendada, sería el caso del acero P92. En el caso económico, se aprecia que esta tendencia se mantiene, así pues se constata la idoneidad del acero P92 frente al 316.

Del mismo modo, para aplicaciones frías, la obtención de los impactos medioambientales puso de manifiesto que el acero A516 sería el más recomendable en estas aplicaciones. A su vez, resulta más económico que el T22 por lo que se deduce que la superioridad del acero A516 frente al T22 para aplicaciones frías, por ser menos impactante y más económico.

### 6.9.2. Fluidos de transferencia de calor.

Teniendo en cuenta la Tabla 5 Propiedades de la sal binaria, sal Hitec y aceite Therminol de Cable et al <sup>286</sup>, expuesta en el Capítulo 3, y considerando una equivalencia entre dólar y euro de 1 €= 1,06282 \$, se obtiene la Tabla 81, con la que se construye la Figura 114.

FLUIDO	PRECIO €/kg
Sal solar binaria	0,46
Sal solar Hitec	0,88
Aceite térmico Therminol	3,73

Tabla 81. Relación de costes en €/kg de fluido de transmisión térmica.

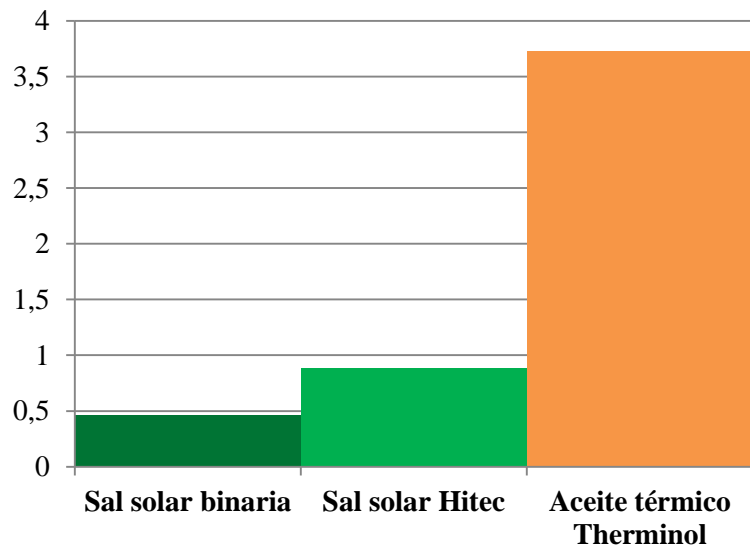


Figura 114. Costes en €/kg de fluido.

Tras evaluar los aspectos medioambientales mediante la técnica de ACV, se observó el mejor comportamiento, por su reducción en todos los impactos, de las sales fundidas, frente al aceite térmico. Dentro de las sales fundidas, presentó una mejora medioambiental la sal solar Hitec frente a la sal binaria.

En este caso, evaluando aspectos económicos, se aprecia que el aceite térmico es unas 4 veces más elevado en precio que la sal Hitec, y unas 8 veces que la binaria. Por todo ello, se pone de manifiesto la recomendación en el uso de sales fundidas como fluido caloportador circulante por los colectores, en lugar de aceite térmico. Es decir, se

<sup>286</sup> Cable, R., Blake, K. O. C. D., NREL, H. P., & Potrovitza, N. (2003) *Overview on use of a Molten Salt HTF in a Trough Solar Field*. NREL.

aprecia una apuesta clara a lo largo de toda la presente tesis doctoral de los sistemas directos (aquellos en los que fluido de transferencia de calor coincide con el de almacenamiento térmico, siendo éste sales fundidas) frente a los indirectos (aquellos en los que se usa aceite como fluido caloportador y sales fundidas como fluido de almacenamiento).

En cuanto a las sales fundidas, si bien es cierto que la sal solar Hitec es aproximadamente es el doble de costosa frente a la binaria, sus propiedades físico-químicas, expuestas a lo largo de este trabajo de investigación, así como su reducción en el impacto medioambiental hacen de ella la opción a elegir superando el sobre coste que supone su implantación frente a la sal solar binaria.

La principal razón que hace encarecer el coste de un sistema directo frente a uno indirecto es debida al punto de fusión de las sales, que hará que se requiera un sistema de resistencias sobre el trazado para mantener las sales en su estado fundido y no tener problemas con su congelación. Este sistema estará presente tanto en el caso de sal solar Hitec, como en el caso que se use sal binaria.

La sal binaria tiene una temperatura de fusión ( $220^{\circ}\text{C}$ ) superior a la de la Hitec ( $142^{\circ}\text{C}$ ), por lo tanto, el sistema anteriormente descrito tendrá un gasto eléctrico superior en el caso de la sal binaria que en el caso de la sal solar Hitec, encareciendo con ello el sistema.

A su vez, los rendimientos que se alcanzan gracias a las temperaturas de la sal Hitec en el ciclo Rankine, son superiores a los de la sal solar binaria, debido al mayor rango de temperatura de trabajo ( $\Delta T$ ) en la sal Hitec frente a la binaria. Esto, derivará en una mejora productiva de la planta en el caso de la sal solar Hitec.

Así pues, el aumento en la productividad (que supone una mejora sobre los aspectos económicos), así como la reducción de costes del sistema para calefactar tuberías, hacen de la sal Hitec, en el caso de centrales termosolares con tecnología cilindro-parabólica, y pese a su sobre coste, una elección más adecuada que el aceite térmico y que la sal binaria.



### 6.9.3. Centrales.

En el inventario de ciclo de vida de las centrales analizadas se había determinado las cantidades de cada material necesarias en cada una de las 16 opciones planteadas. Así pues, se ha cuantificado el coste de dichos materiales para comprobar las configuraciones que presentan una alternativa más económica. Partiendo de los mismos datos en €/kg de los dos apartados anteriores, y con el inventario de kg de material recogido en el punto 6.5.4 de este trabajo de investigación, se construye la Tabla 82, Figura 115 y Figura 116.

Nombre en gráficas	Coste de materiales en 50 MW.	Coste de materiales en 150 MW. Caso real.	Coste de materiales en 150 MW. Caso lineal.	Δ€
<i>Therminol-P92-T22-HiTec</i>	35.315.138 €	104.938.459 €	105.945.414 €	0,95%
<i>P92-T22-HiTec</i>	35.181.097 €	104.536.353 €	105.543.291 €	0,95%
<i>Therminol-P92-T22-Binaria</i>	19.914.950 €	58.608.038 €	59.744.850 €	1,90%
<i>P92-T22-Binaria</i>	19.718.115 €	58.017.545 €	59.154.346 €	1,92%
<i>Therminol-P92-A516-HiTec</i>	35.033.679 €	104.284.784 €	105.101.036 €	0,78%
<i>P92-A516-HiTec</i>	35.081.235 €	104.327.530 €	105.243.704 €	0,87%
<i>Therminol-P92-A516-Binaria</i>	19.815.087 €	58.399.215 €	59.445.262 €	1,76%
<i>P92-A516-Binaria</i>	19.618.253 €	57.808.722 €	58.854.758 €	1,78%
<i>Therminol-316-T22-HiTec</i>	35.622.317 €	105.868.245 €	106.866.950 €	0,93%
<i>316-T22-HiTec</i>	35.488.276 €	105.466.139 €	106.464.827 €	0,94%
<i>Therminol-316-T22-Binaria</i>	20.222.128 €	59.537.824 €	60.666.385 €	1,86%
<i>316-T22-Binaria</i>	20.025.294 €	58.947.331 €	60.075.882 €	1,88%
<i>Therminol-316-A516-HiTec</i>	35.522.454 €	105.659.423 €	106.567.362 €	0,85%
<i>316-A516-HiTec</i>	35.388.413 €	105.257.316 €	106.165.239 €	0,86%
<i>Therminol-316-A516-Binaria</i>	20.122.266 €	59.329.001 €	60.366.797 €	1,72%
<i>316-A516-Binaria</i>	19.925.431 €	58.738.508 €	59.776.294 €	1,74%

Tabla 82. Resultados económicos del coste de los materiales implicados en las plantas bajo estudio, así como estimación de la variación entre el caso de 150MW real y uno con crecimiento lineal partiendo de la planta de 50 MW.

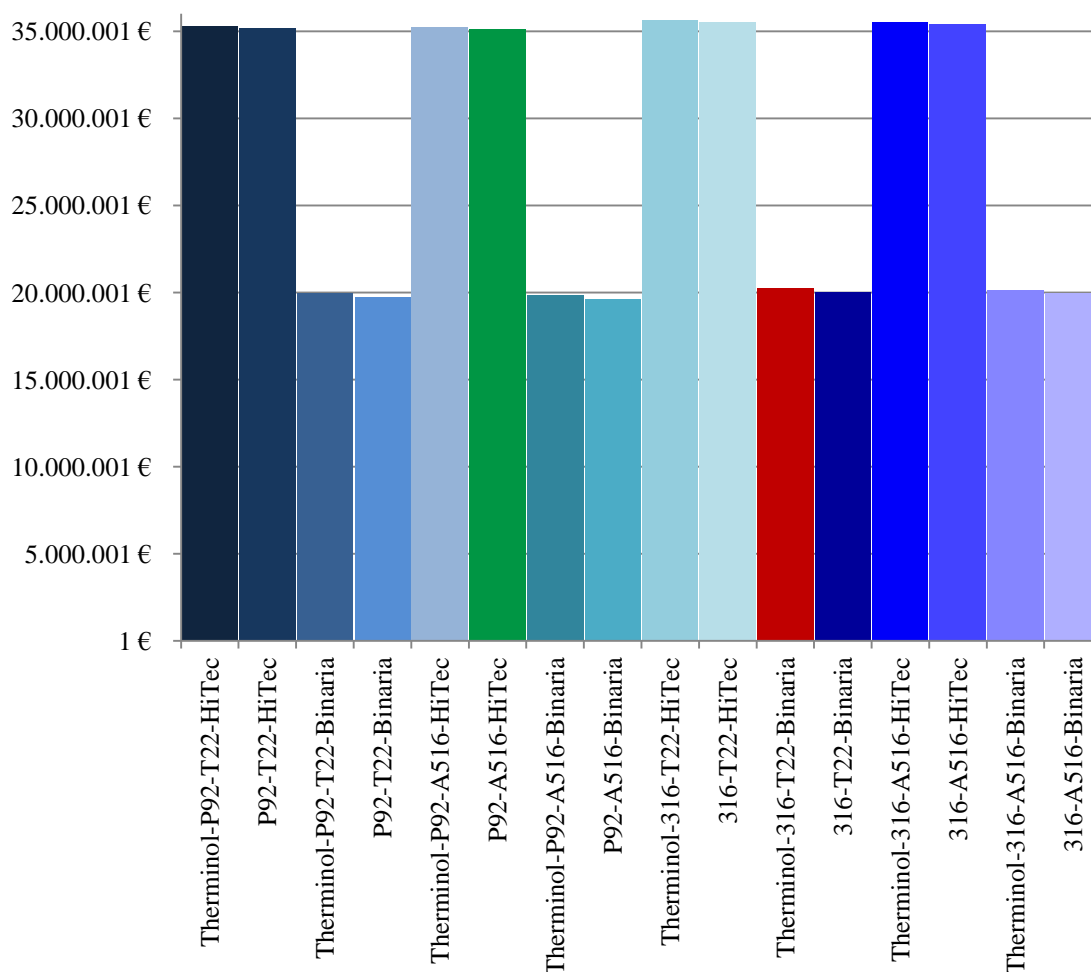


Figura 115. Coste de materiales, en las diferentes configuraciones de central, para el caso de 50MW.

El caso analizado está solo centrado en el coste de los materiales que se han analizado a lo largo de toda la presente tesis doctoral, que son aquellos que forman parte del circuito de captación de la radiación solar y el del almacenamiento térmico. Tal y como se ha desarrollado, no se contempla el circuito de producción de vapor, ni los heliostatos, ni os materiales estructurales de la planta.

En las figuras 115 y 116, se tiene el coste de materiales, en las diferentes configuraciones de central, para el caso de 50MW y 150 MW, respectivamente. En ambas se ha marcado en verde la opción que medioambientalmente había resultado menos impactante tras los ACV realizados, y en rojo aquella que resultó más desfavorable por presentar impactos medioambientales más elevados.

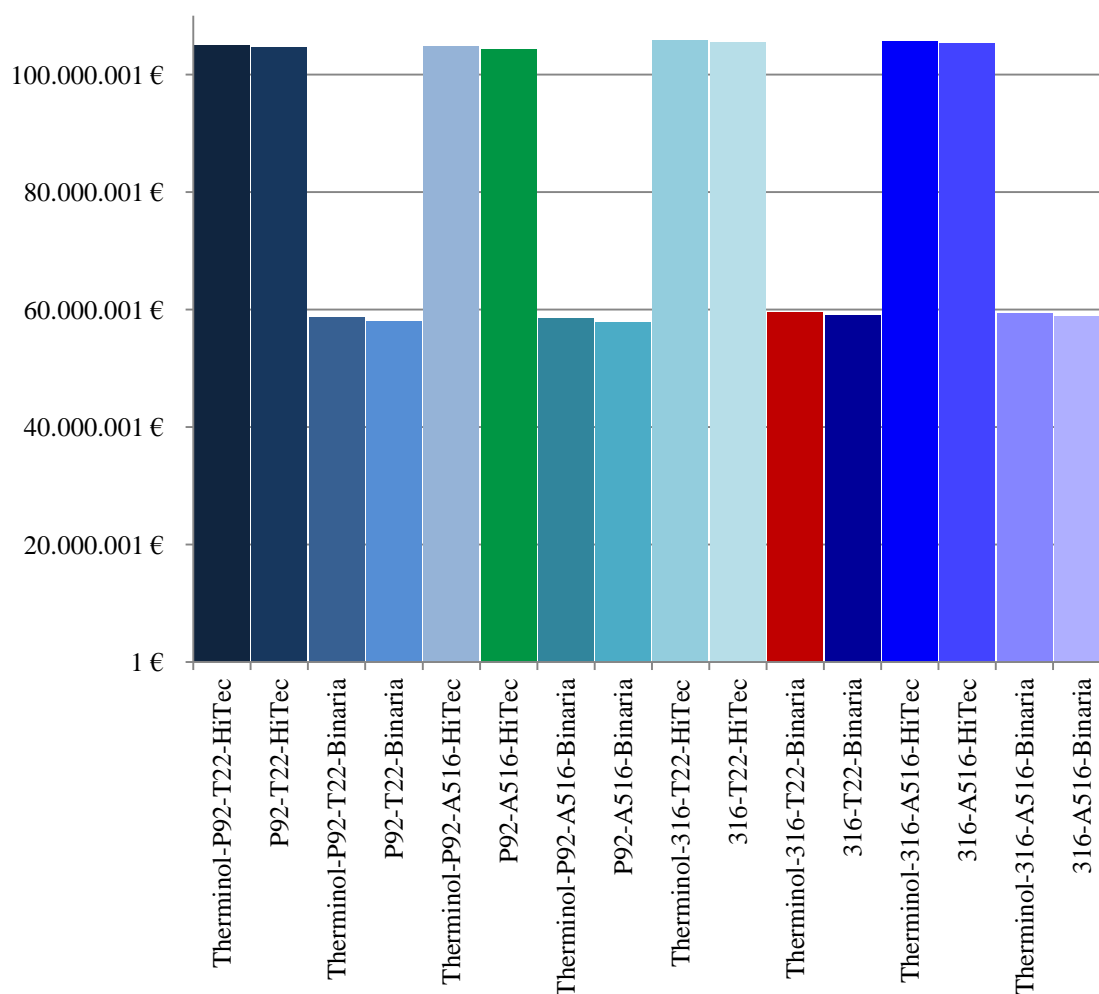


Figura 116. . Coste de materiales, en las diferentes configuraciones de central, para el caso de 150MW.

En ambas figuras (115 y 116) se aprecia que las opciones con almacenamiento con sal solar Hitec son las que presentan un coste superior. Comparando sistemas con Therminol y sistemas con sal fundida, los casos con Therminol siempre resultan menos económicos. De las opciones con almacenamiento térmico con Hitec, la opción medioambientalmente más favorable (marcada en verde) es, también, la más económica). De las opciones con almacenamiento con sal solar binaria, la opción más impactante con el medioambiente (marcada en rojo), es, a su vez, la menos económica.

En cuanto a los aceros, destacar que, como se vió de manera unitaria, los aceros con menos impactos en el medioambiente son además aquellos que conforman las configuraciones más económicas.

Cabe destacar que las figuras 115 y 116 son semejantes, es decir, presentan la misma forma pero con un tamaño diferente. Es decir, se ha comprobado que un aumento de

potencia de 50 MW a 150 MW presenta un aumento en materiales, que se traduce en un aumento en costes con un crecimiento lineal. Tal y como aparece reflejado en la Tabla 82 en la columna  $\Delta\epsilon$ . Este  $\Delta\epsilon$  es la diferencia entre los resultados de costes de materiales de la planta de 150 MW (nombrado en la Tabla 82 como Coste de materiales en 150 MW. Caso real) y lo que costaría una planta de 50MW multiplicado por 3 (nombrado en la Tabla 82 como Coste de materiales en 150 MW. Caso lineal). Tal y como se puede apreciar, en ningún caso este  $\Delta\epsilon$  supera el 2%, con lo que se puede apreciar el crecimiento lineal entre potencia, cantidad de materiales y dinero.

Según García Garrido, S<sup>287</sup>, tomando como referencia las plantas cilindro-parabólicas construidas en España entre los años 2007 y 2013, se tiene que una central de este tipo y sin almacenamiento térmico tiene un coste en torno a los 225.000.000 € y con 7h de almacenamiento térmico con sales fundidas de, en torno a, 320.000.000 €.

Así pues, tomado el caso de 50MW, los materiales implicados en circuito caloportador y de almacenamiento térmico, en las opciones con sal solar binaria supondrían un 6% del coste total de la central estimado y en las opciones con sal solar Hitec un 11%. El porcentaje restante iría destinado a partidas tales como resto de materiales, turbina, ingeniería del proyecto, permisos y licencias de construcción, montaje y puesta en marcha, etc.

Salvando las diferencias económicas entre sal solar Hitec y Binaria, se aprecia la consonancia entre aspectos económicos y medioambientales. Aunque no se ha cuantificado el grado de detalle, las ventajas que supone la sal Hitec frente a la binaria (sistema de calefacción de tuberías más económico y mejora de la eficiencia en ciclo Rankine), y sabiendo que se trata de en torno a un 5% de sobre coste sobre el presupuesto final frente a sal solar binaria, se puede deducir la conveniencia del uso de sal solar Hitec frente a aceite térmico y sal binaria.

---

<sup>287</sup> García Garrido, S., (2015). *Construcción y puesta en marcha de centrales termosolares CCP*. RENOVETEC.

## CAPÍTULO VII

## **7.CONCLUSIONES.**

# CONCLUSIONES

A partir de los Análisis de Ciclo de Vida realizados sobre los aceros, sales fundidas y aceite térmico implicados en centrales termosolares con tecnología cilindro parabólica, así como las diferentes posibles combinaciones de ellos estudiadas en el seno de una central de 50 MW y de 150 MW. se pueden extraer como principales conclusiones las que se exponen a continuación.

- 1.** El ACV con metodología CML realizado para una unidad funcional de 1kg de material, refleja que los aceros P92, AISI316, A516 y T22, presentan los impactos más elevados en las categorías eutrofización (kg  $\text{PO}_4^{---}$  eq), agotamiento de los recursos abióticos (kg Sb eq) y toxicidad humana (kg 1,4-DB eq). Así pues, estas son aquellas categorías en las que la producción de estos aceros supone la mayor huella medioambiental. A su vez, cabe destacar, que en agotamiento del ozono estratosférico (kg CFC-11 eq) estos materiales no tienen una contribución que perjudique sustancialmente a esta categoría, ya que en los cuatro aceros estudiados no representa en ningún caso, normalizado, el 5% de cualquiera de los demás impactos.
- 2.** Existen aceros apropiados por sus capacidades físico-químicas a aplicaciones sometidas a mayor temperatura las cuales, a lo largo de este trabajo de investigación se han denominado aplicaciones calientes, y a temperaturas inferiores o aplicaciones frías. Se ha comprobado que para las aplicaciones calientes, el acero P92 en todas las categorías de impacto analizadas obtiene mejores resultados, por lo tanto es el adecuado desde un punto de vista con el medio ambiente y, por ello, se recomienda el uso de P92 frente al 316; Para las aplicaciones frías, del mismo modo, se recomienda el uso de A516 frente al T22 ya que en todas las categorías de impacto obtiene mejores resultados. A su vez, viendo los cuatro aceros en conjunto, se concluye que el acero más perjudicial en materia de sostenibilidad es el 316, ya que presenta impactos superiores a los otros tres aceros analizados, en todas las categorías de impacto.

- 3.** Existen aleantes en los aceros cuya composición en peso es de un porcentaje reducido que, sin embargo, suponen una gran contribución a los impactos medioambientales. En este sentido, se pudo comprobar que el molibdeno es el aleante que aporta una mayor contribución a las categorías con, a su vez, mayores impactos. Se concluye que, en todos los aceros el molibdeno presente en los aceros estudiados es el componente que provoca las mayores aportaciones en los indicadores medioambientales más problemáticos en materia de sostenibilidad.
- 4.** Para las sales fundidas Hitec y binaria las categorías de impacto más perjudiciales son: agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles) y cambio climático, seguidas de acidificación y eutrofización. La sal Hitec presenta un mejor comportamiento medioambiental en todas las categorías de impacto frente a la sal solar binaria. En la sal solar binaria el nitrato sódico (60% composición en peso) representa las mayores contribuciones a todos los impactos. En la sal solar Hitec se reduce al 7%, consiguiendo con esto una reducción global en todas las categorías. Ni siquiera empeorada por el aumento del 40% al 53% de nitrato potásico en su composición y la adición del 40 % de nitrito sódico. Por lo que se puede determinar que la sal solar Hitec es un ejemplo de mejora de las propiedades técnicas y medioambientales con respecto a la sal solar binaria. Para el aceite térmico, las categorías más perjudiciales son: toxicidad humana, acidificación, agotamiento de recursos abióticos (combustibles fósiles) y cambio climático. Un porcentaje importante en composición (26,5% de bifenilo), no tiene grandes contribuciones a los impactos, la mayoría de ello viene derivado del óxido de difenilo.
- 5.** En la comparativa unitaria de los fluidos de almacenamiento térmico/transferencia de calor, es decir las sales fundidas y el aceite térmico, se tiene que el aceite térmico obtiene resultados superiores a las sales en todas las categorías de impacto. Por lo que se concluye que el comportamiento medioambiental de las sales fundidas, binaria y Hitec, es siempre más conveniente que el del aceite térmico Therminol.



**6.** Para los casos de las centrales, tanto en 50MW como en 150MW, las categorías más impactantes son:

- Agotamiento recursos abióticos (combustibles fósiles): viene marcado por el alto contenido en las sales. Es la peor categoría para sales, así pues es la peor categoría general.
- Cambio climático: Es la segunda categoría más nociva para las sales, así pues, lo es para la general.
- Eutrofización: Para las sales es la cuarta categoría, para aceros la primera. Marca la tendencia los aceros. Peor categoría para el peor acero, aparecen los repuntes en aquellas con 316.
- Agotamiento de los recursos abióticos: las sales no impactan en esta categoría notablemente, por eso es una categoría marcada por los aceros. Los picos aparecen en aquellas composiciones con 316-T22.

La categoría de ecotoxicidad terrestre y agotamiento del ozono estratosférico tanto unitariamente, como en los casos de las centrales completas obtiene mejores resultados la sal solar binaria frente a la Hitec.

**7.** Los sistemas indirectos resultan menos sostenibles. Esta afirmación proviene del hecho de que las centrales analizadas presentan impactos medioambientales inferiores en aquellos casos en el que se evita el aceite térmico y es sustituido por cualquiera de las dos sales estudiadas. Además, está en consonancia con los ACV de los procesos unitarios, en lo que se pudo apreciar que las sales fundidas tenían un comportamiento medioambiental más adecuado (por sus impactos menores) que el aceite térmico.

- 8.** De las centrales analizadas, además, cabe destacar que las partes con mayor problemática medioambiental son los depósitos, por su alto contenido en sales. La combinación más sostenible es el sistema directo formado por acero P92 para las aplicaciones calientes y A516 para las aplicaciones frías con almacenamiento térmico mediante la sal fundida Hitec. La combinación menos sostenible es el sistema indirecto, con Therminol como HTF, formado por acero 316 para las aplicaciones calientes y T22 para las aplicaciones frías. Con almacenamiento térmico mediante la sal fundida binaria.
- 9.** La central de 150MW presenta una potencia de tres veces la de 50MW, sin embargo no ocurre lo mismo con sus impactos medioambientales. Los impactos de la central tres veces superior, no son tres veces superiores, sino unos puntos porcentuales menos. Por lo tanto, se puede concluir que la relación potencia-impacto no presenta una tendencia estrictamente lineal sino que se desvía ligeramente de ella.
- 10.** Por último. Económicamente, al igual que medioambientalmente, se desaconseja el uso de acero 316 en aplicaciones calientes, se recomienda el acero P92 para ello. En la misma línea, se desaconseja el uso de acero T22 frente al A516 para aplicaciones frías, se encuentran en consonancia el aspecto económico y el medioambiental. Las sales fundidas resultan más baratas que el aceite térmico, así pues se recomienda su uso como HTF frente al aceite, tanto medioambiental como económicamente. Dentro de ellas, la Hitec es menos impactante sobre el medioambiente aunque resulta con un coste inicial superior a la binaria. Por sus características fisicoquímicas de mejora de temperaturas de trabajo respecto a la binaria, así como su mejor comportamiento medioambiental, se recomienda la sal Hitec frente a la binaria ya que, su sobre coste se ve compensado con la mejora que supone técnica y ambientalmente en las plantas cilindro-parabólicas frente a la sal binaria.

## **8.SUMMARY.**

# SUMMARY

This research is based on renewable energy and particularly focused on parabolic trough concentrating solar power technology.

Concentrating Solar Power (CSP) enjoys a considerable advantage over other renewables in that it is manageable through the use of Thermal Energy Storage (TES) systems. The storage is done in steel tanks filled by molten salts. The contact between steel and salt produces material corrosion phenomenon then that must be resolved with advances in technology. Historically, the parabolic trough solar plants have been composed by a primary circuit made of steel absorber tubes in where circulates through them Heat Transfer Fluid (HTF). It is called indirect system.

HTF is technologically limited by their maximum operating temperature which affecting decreasing the power cycle efficiencies. While the molten salts have a higher maximum operating temperature. If molten salt is used both as HTF and TES then the system is called direct. Currently, there are many studies which consider the benefits of direct systems.

Therefore, this thesis is a material assessment. However, there is not a material assessment from the conventional point of view, in which mechanical, chemical, thermal properties are studied. It is an environmental analysis. In fact, this is the main contribution of this research.

Steels selected are: P92 and 316 for high temperature applications such as absorber tubes, pipes and hot storage tanks. Steels 516 and T22 applied in lower temperatures parts of the plant, such as cold storage tank, are also assessed. Therminol is studied as HTF and binary solar salt and solar salt Hitec as HTF and TES.

Every studied material (steel P92, steel AISI316, steel T22, steel 316, molten binary salt, molten Hitec salt and Therminol) was characterized and normalized with Life Cycle Assessment (LCA) techniques by using the CML methodology to get the following

impact categories: Climate Change (GWP100), abiotic depletion, ozone depletion, human toxicity, terrestrial ecotoxicity, photochemical oxidation, acidification and eutrophication. In addition, the water footprint of all of them is characterized by Boulay et al. methodology. There were several LCA done, it started by unitary LCA's of each material, then a comparative LCA between different steels and also a comparative LCA of the TES/HTF were done. The software used for this was SimaPro 8 and the database selected was Ecoinvent 3.

Subsequently the amounts of these materials involved in two real parabolic trough plants are inventoried, using references and SAM software. The plants selected are a 50 MW and a 150 MW parabolic trough and both were analyzed with LCA.

The major conclusions derived from the research work, were the followings:

The major contributor in steel impacts was molybdenum. In hot applications is it recommendable using P92 steel instead of 316 for presenting lower environmental impacts than 316 steel. Similarly, the better environmental behavior in cold applications is represented by A516 versus T22. Then the most respectful plant have involved A516 steel in cold applications and P92 in hot applications. With the study of the heat transfer fluids, it is obtained that the thermal oil is more harmful than molten salts. Then it is possible to conclude that a direct system is less harmful for the environment than indirect system.

## **9.RESUMEN.**

# RESUMEN

El presente trabajo de investigación está desarrollado en el entorno de las energías renovables y, particularmente, centrado en las centrales solares térmicas de concentración con arquitectura cilindro-parabólica.

La energía termosolar presenta numerosas ventajas entre las que destaca su gestionabilidad gracias a la inclusión del almacenamiento térmico de energía, que se realiza en tanques de acero ocupados por sales fundidas. Es sabido que el contacto entre acero y sal produce problemas de degradación de materiales que se deben subsanar con el avance de la técnica. A su vez, las centrales termosolares cilindro-parabólicas históricamente se han dotado de un circuito primario compuesto por tubos absorbedores de la radiación solar, fabricados en acero, por los que circula el fluido de transferencia de calor, que se trata de un aceite térmico. Es lo que se conoce como un sistema indirecto.

El aceite térmico presenta un techo tecnológico en su temperatura de operación máxima lo que supone que para obtener mejores eficiencias en los ciclos de potencia se deben buscar nuevos materiales que lo sustituyan, como pueden ser las propias sales fundidas ya que alcanzan temperaturas de operación superiores. Si se contempla el uso de sal fundida simultáneamente como fluido de transferencia de calor y de almacenamiento térmico, se denomina sistema directo y, actualmente, están desarrollándose estudios que fomentan esta tipología.

Todo ello, sumado a la necesidad de mejora de las propiedades de aceros y sales previamente indicados, enmarca esta tesis doctoral en un análisis de materiales. Sin embargo, no se trata de un análisis y selección de materiales desde el punto de vista convencional, en el que se estudian las propiedades mecánicas, químicas, térmicas, etc. de los mismos, sino de un análisis medioambiental. De hecho, esto es la principal novedad y aporte de este trabajo.

Los aceros estudiados son P92 y 316 para las aplicaciones calientes como son los tubos absorbedores, las conducciones y los tanques de almacenamiento de sales calientes.

Y los aceros 516 y T22, que se utilizan en aplicaciones sometidas a temperaturas inferiores como son los tanques de almacenamiento de sales frías. El aceite térmico estudiado es el comercial Therminol y las sales fundidas son la sal solar binaria y la sal solar Hitec.

Se caracterizan medioambientalmente los cuatro aceros, las dos sales fundidas y el aceite térmico con la técnica de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con metodología CML, mediante lo que se obtienen los indicadores: Cambio Climático (GWP100), Agotamiento de recursos abióticos, Agotamiento del ozono estratosférico, Toxicidad humana, Ecotoxicidad terrestre, Formación de oxidación fotoquímica, Acidificación y Eutrofización. Además, se caracteriza la huella hídrica de todos ellos mediante metodología Boulay. Se caracterizan y normalizan de manera unitaria y también se realizan diversas comparativas. El software utilizado para ello fue SimaPro 8.

Posteriormente se inventarian las cantidades de estos materiales implicados en dos centrales cilindro-parabólicas reales, haciendo uso de referencias bibliográficas y del software SAM. Una de 50 MW y otra de 150 MW y se analizan con sendos ACVs.

De todo ello se obtienen diversas conclusiones entre las que destacan la idoneidad de colocar en las aplicaciones calientes el acero P92 en lugar del 316 por presentar indicadores de impacto medioambiental inferiores en todas las categorías analizadas. Del mismo modo, se comprueba el mejor comportamiento medioambiental del A516 frente al T22 para las aplicaciones frías.

Igualmente, de estudiar los fluidos de transferencia de calor, se obtiene que el aceite térmico es trascendentalmente más perjudicial que las sales fundidas. De ello se concluye la idoneidad medioambiental de los sistemas directos frente a los indirectos.



## **10. BIBLIOGRAFÍA CITADA.**

1. *Concentrating Solar Power Projects - Solar Electric Generating Station I Concentrating Solar Power NREL*. (2009). *Nrel.gov*. Accedido el 23 de mayo 2016, desde [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=28](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=28)
2. *Concentrating Solar Power Projects - Solar Electric Generating Station IX Concentrating Solar Power NREL*. (2009). *Nrel.gov*. Accedido el 23 de mayo 2016, desde [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=36](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=36)
3. *Concentrating Solar Power Projects - Planta Solar 10 Concentrating Solar Power NREL*. (2015). *Nrel.gov*. Accedido el 23 de mayo 2016, desde [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=38](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=38)
4. Liu, M., Tay, N. S., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., & Bruno, F. (2016). *Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1411-1432.
5. Tortorelli, P. F., Bishop, P. S., & DiStefano, J. R. (1989). *Selection of corrosion-resistant materials for use in molten nitrate salts* (No. ORNL/TM-11162). Oak Ridge National Lab., TN (USA).
6. Bradshaw, R. W., & Clift, W. M. (2010). *Effect of chloride content of molten nitrate salt on corrosion of A516 carbon steel*. Sandia report.
7. Hernández-Moro, J., & Martínez-Duart, J. M. (2012). *CSP electricity cost evolution and grid parities based on the IEA roadmaps*. *Energy policy*, 41, 184-192.
8. Grogan, D. C. (2013). *Development of Molten-Salt Heat Transfer Fluid Technology for Parabolic Trough Solar Power Plants-Public Final Technical Report* (No. DOE/08GO18038). Abengoa Solar, LLC.
9. Cable, R., Blake, K. O. C. D., NREL, H. P., & Potrovitza, N. (2003) *Overview on use of a Molten Salt HTF in a Trough Solar Field*.

10. Medrano, M., Gil, A., Martorell, I., Potau, X., & Cabeza, L. F. (2010). *State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 56-72.
11. Hauschild, M., Jeswiet, J., & Alting, L. (2005). *From life cycle assessment to sustainable production: status and perspectives*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 54(2), 1-21.
12. Góralczyk, M. (2003). *Life-cycle assessment in the renewable energy sector*. Applied Energy, 75(3), 205-211.
13. Weinrebe, G., Boehnke, M., & Trieb, F. (1998). *Life cycle assessment of an 80 MW SEGS plant and a 30 MW Phoebus power tower*. Solar Engineering, 417-424.
14. Bhat, I. K., & Prakash, R. (2008). *LCA of renewable energy for electricity generation systems—a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(5), 1067-1073.
15. Piemonte, V., De Falco, M., Tarquini, P., & Giaconia, A. (2011). *Life cycle assessment of a high temperature molten salt concentrated solar power plant*. Solar Energy, 85(5), 1101-1108.
16. Laing, D., Steinmann, W. D., Viebahn, P., Gräter, F., & Bahl, C. (2010). *Economic analysis and life cycle assessment of concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants*. Journal of Solar Energy Engineering, 132(4), 041013.
17. Lechón, Y., de la Rúa, C., & Sáez, R. (2008). *Life cycle environmental impacts of electricity production by solarthermal power plants in Spain*. Journal of Solar Energy Engineering, 130(2), 021012.

18. Vigon, B. W., & Harrison, C. L. (1993). *Life-cycle assessment: Inventory guidelines and principles*.
19. Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The limits to growth*. New York, 102.
20. Goldsmith, E. (1974). *Blueprint for survival*. Signet.
21. Hunt, R., Franklin, W. (1996). *LCA -How it came about. Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA*. International Journal of Life Cycle Assessment 1(1): 4-7.
22. ISO, E. (2006). 14040: 2006. *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*.
23. Viebahn, P., Kronshage, S., & Lechon, Y. (2008). *Deliverable n 12.2-RS Ia. Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants*. New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS) Integrated Project, EU 6th Framework Programme, Brussels.
24. Lechón, Y., de la Rúa, C., & Sáez, R. (2008). *Life cycle environmental impacts of electricity production by solarthermal power plants in Spain*. Journal of Solar Energy Engineering, 130(2), 021012.
25. Burkhardt, J. J., Heath, G. A., & Turchi, C. S. (2011). *Life cycle assessment of a parabolic trough concentrating solar power plant and the impacts of key design alternatives*. Environmental science & technology, 45(6), 2457-2464.
26. Pihl, E., Kushnir, D., Sandén, B., & Johnsson, F. (2012). *Material constraints for concentrating solar thermal power*. Energy, 44(1), 944-954.

27. Ehtiawesh, I. A., Coelho, M. C., & Sousa, A. C. (2016). *Exergetic and environmental life cycle assessment analysis of concentrated solar power plants*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56, 145-155.
28. Rahman, S. M., Handler, R. M., & Mayer, A. L. (2016). *Life cycle assessment of steel in the ship recycling industry in Bangladesh*. Journal of Cleaner Production, 135, 963-971.
29. Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H. J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., & Spielmann, M. (2005). *The ecoinvent database: Overview and methodological framework (7 pp)*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 10(1), 3-9.
30. McDonough, W., & Braungart, M. (2010). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. MacMillan.
31. Bryant, L. (1967). *The origin of the automobile engine*. Scientific American, 216(3).
32. Durkin, C. (2012) *Nuclear Powered Passenger Vehicles*. Stanford University Press.
33. Dopazo, C., & Mielgo, P. (2015). *La energía nuclear, hoy y mañana*. Funciva documentos. 233.
34. Abbott, C., Rogers, P., Sloboda, J. A., & Blasco, F. (2008). *Más allá del terror: las verdaderas amenazas que acechan al mundo*. Los libros del lince.
35. King, D. A. (2004). *Climate change science: adapt, mitigate, or ignore*. Science, 303(5655), 176-177.
36. Solomon, S. (2007). *Climate change 2007*. Cambridge: Cambridge University Press.

37. Karl, D. M., & Lukas, R. (1996). *The Hawaii Ocean Time-series (HOT) program: Background, rationale and field implementation*. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 43(2), 129-156.
38. sv.gsfc.nasa.gov,. (2016). *GMS: A Year In The Life Of Earth's CO<sub>2</sub>*. Accedido el 12 febrero 2016, desde <http://sv.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=11719>
39. Change, I. C. (2013). The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. K., Tignor, M., Allen, SK, Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, PM, Eds, 1535.
40. Team, E. NOAA/ESRL Global Monitoring Division - *THE NOAA ANNUAL GREENHOUSE GAS INDEX (AGGI)*. *Esrl.noaa.gov*. Accedido el 24 de mayo 2016, desde <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>
41. European Environment Agency, 2016,. (2016). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2014 and inventory report 2016*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
42. IPCC. (2007). *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Synthesis Report*. [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland
43. Solomon, S. (Ed.). (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge University Press.
44. Foster, G., & Rahmstorf, S. (2011). Global temperature evolution 1979? 2010.*Environmental Research Letters*, 6(4), 044022.

45. Santer, B. D., Taylor, K. E., Wigley, T. M., Penner, J. E., Jones, P. D., & Cubasch, U. (1995). Towards the detection and attribution of an anthropogenic effect on climate. *Climate Dynamics*, 12(2), 77-100.
46. Stott, P. A., Tett, S. F. B., Jones, G. S., Allen, M. R., Mitchell, J. F. B., & Jenkins, G. J. (2000). External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. *Science*, 290(5499), 2133-2137.
47. Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2010). Global surface temperature change. *Rev. Geophys.*, 48(4).
48. Met Office,. (2016). *2015: the warmest year on record, say scientists*. Accedido el 15 febrero 2016, desde <http://www.metoffice.gov.uk/news/releases/archive/2016/2015-global-temperature>
49. GISTEMP Team, (2016). *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP)*. NASA Goddard Institute for Space Studies. Accedido el 16 de febrero de 2016 desde <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.
50. Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K., (2010). *Global surface temperature change*. *Rev. Geophys.*, 48, RG4004, doi:10.1029/2010RG000345.
51. NOAA National Centers for Environmental Information. *State of the Climate: National Overview for January*. (2016), accedido el 15 de febrero de 2016 desde <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/national/201601>.
52. GISTEMP Team (2016). *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP)*. NASA Goddard Institute for Space Studies. Accedido el 16 de febrero de 2016 desde <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.
53. Met Office,. (2016). *2015: the warmest year on record, say scientists*. Accedido el 15 de febrero de 2016, desde

- <http://www.metoffice.gov.uk/news/releases/archive/2016/2015-global-temperature>.
54. Coumou, D., Rahmstorf, S. (2012). *A decade of weather extremes*. Nature Climate Change, 2, 491–496.
55. Trenberth, K. E. (2010). *Changes in precipitation with climate change*. Climate Research, 47, 123–138.
56. Cozzi, L. (2011). *World Energy Outlook 2011*. International Energy Agency.
57. Schellnhuber, H. J., Hare, W., Serdeczny, O., Adams, S., Coumou, D., Frieler, K., & Rocha, M. (2012). *Turn down the heat: why a 4 C warmer world must be avoided* (p. 106). World Bank.
58. Rogelj, J., Meinshausen, M., & Knutti, R. (2012). *Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates*. Nature climate change, 2(4), 248-253.
59. Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., & La Rovere, E. L. (2000). *Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (No. PNNL-SA-39650). Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (US).
60. Robbins, A. (2016). *How to understand the results of the climate change summit: Conference of Parties21 (COP21) Paris 2015*. Journal of public health policy.
61. Climate.nasa.gov,. (2016). Accedido 14 febrero 2016, desde [http://climate.nasa.gov/climate\\_resources/125/](http://climate.nasa.gov/climate_resources/125/)



62. Oerlemans, J., & Fortuin, J. (1992). *Sensitivity of Glaciers and Small Ice Caps to Greenhouse Warming*. Science, 258(5079), 115-117.
63. Purkey, S. G., & Johnson, G. C. (2013). *Antarctic Bottom Water warming and freshening: Contributions to sea level rise, ocean freshwater budgets, and global heat gain*. Journal of Climate, 26(16), 6105-6122.
64. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., & Miller, H. L. (2007). *Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2007*. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
65. Bamber, J. L., & Aspinall, W. P. (2013). *An expert judgement assessment of future sea level rise from the ice sheets*. Nature Climate Change, 3(4), 424-427.
66. Church, J. A., & White, N. J. (2011). *Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century*. Surveys in Geophysics, 32(4-5), 585-602.
67. Reager, J. T., Gardner, A. S., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Eicker, A., & Lo, M. H. (2016). *A decade of sea level rise slowed by climate-driven hydrology*. Science, 351(6274), 699-703.
68. Shiva, V. (2015). *Soil not oil: Environmental justice in an age of climate crisis*. North Atlantic Books.
69. Armaroli, N., & Balzani, V. (2007). *The future of energy supply: challenges and opportunities*. Angewandte Chemie International Edition, 46(1-2), 52-66.
70. Tertzakian, P. (2006). *A thousand barrels a second*. McGraw-Hill.
71. Simmons, M. R. (2005). *Twilight in the Desert*. Hoboken.

72. CAIT Climate Data Explorer - Top 10 Emitters 2012. (2016). *Johannesfriedrich.com*. Accedido el 21 mayo 2016, desde <http://johannesfriedrich.com/circle/circle.htm>
73. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* (Vol. 3). Cambridge University Press.
74. International Energy Agency, IEA (2014). *World Energy Outlook*. IEA.
75. Muñoz, B., García-Verdugo, J., & San-Martín, E. (2015). *Quantifying the geopolitical dimension of energy risks: A tool for energy modelling and planning*. *Energy*, 82, 479-500.
76. Brunch, C. *Second Meeting of the UN Environment Assembly (2016)*. Nairobi, Kenya.
77. European Commission,. (2015). *State of the Energy Union. Country Factsheet Spain*. Brussels.
78. González-Eguino, Mikel (2014) *La pobreza energética y sus implicaciones*. BC3 Working Paper Series 2014-08. Basque Centre for Climate Change (BC3). Bilbao, Spain.
79. United Nations,. (2014). *Sustainable Energy for All*.
80. United Nations,. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible..*
81. Ren21, R. (2015). *Global status report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, France.
82. *Data and Statistics - IRENA Resource*. (2016). Accedido 1 junio 2016, desde <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=17>

83. Ren21, R. (2016). *Global status report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, France.
84. IRENA REsource. (2016). *Resourceirena.irena.org*. Accedido 28 mayo 2016, desde <http://resourceirena.irena.org/gateway/countrySearch/?countryCode=ESP>
85. Guerrero-Lemus, R., González-Díaz, B., Ríos, G., & Dib, R. N. (2015). *Study of the new Spanish legislation applied to an insular system that has achieved grid parity on PV and wind energy*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 426-436.
86. Alonso, P. M., Hewitt, R., Pacheco, J. D., Bermejo, L. R., Jiménez, V. H., Guillén, J. V., & de Boer, C. (2016). *Losing the roadmap: Renewable energy paralysis in Spain and its implications for the EU low carbon economy*. Renewable energy, 89, 680-694.
87. Red Eléctrica de España, R. E. E. (2016). *El sistema eléctrico español 2015*.
88. Deloitte,. (2016). *European Energy Market Reform. Country profile: Spain*.
89. Red Eléctrica de España, R. E. E. (2014). *El sistema eléctrico español 201*.
90. Jacobs, D. (2016). *Renewable energy policy convergence in the EU: the evolution of feed-in tariffs in Germany, Spain and France*. Routledge.
91. Parlamento Europeo. (2016). *Parlamento Europeo*. Accedido el 25 junio 2016, desde <http://www.europarl.europa.eu/portal/es>
92. Johnson, F. S. (1954). *The solar constant*. Journal of Meteorology, 11(6), 431-439.
93. Van der Hoeven, M. (2013). *World Energy Outlook 2013*. International Energy Agency: Tokyo, Japan.

94. Mills, D. (2004). *Advances in solar thermal electricity technology*. Solar Energy, 76(1), 19-31.
95. Romero, M., & González-Aguilar, J. (2011). *Solar thermal power plants: from endangered species to bulk power production in sun-belt regions*. Energy & Power Generation Handbook, KR Rao, ed., ASME, New York.
96. Brakmann, G., & Raiener, A. (2004). *Energía solar termoeléctrica. 2020 pasos firmes contra el cambio climático*. Greenpeace, Amsterdam.
97. FENERCOM,. (2012). *Guía técnica de la energía solar termoeléctrica*. Documentos de la Comunidad de Madrid.
98. Romero-Alvarez, M., & Zarza, E. (2007). Concentrating solar thermal power. Handbook of energy efficiency and renewable energy, 21-1.
99. Brakmann, G., & Raiener, A. (2004). *Energía solar termoeléctrica. 2020 pasos firmes contra el cambio climático*. Greenpeace, Amsterdam.
100. Brakmann, G., & Raiener, A. (2004). *Energía solar termoeléctrica. 2020 pasos firmes contra el cambio climático*. Greenpeace, Amsterdam.
101. Romero-Alvarez, M., & Zarza, E. (2007). *Concentrating solar thermal power*. Handbook of energy efficiency and renewable energy, 21-1.
102. Kutscher, C. F., Davenport, R. L., Dougherty, D. A., Gee, R. C., Masterson, P. M., & May, E. K. (1982). *Design approaches for solar industrial process-heat systems: nontracking and line-focus collector technologies* (No. SERI/TR-253-1356). Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA).
103. Romero-Alvarez, M., & Zarza, E. (2007). Concentrating solar thermal power. *Handbook of energy efficiency and renewable energy*, 21-1.

104. Romero-Alvarez, M., & Zarza, E. (2007). *Concentrating solar thermal power*. Handbook of energy efficiency and renewable energy, 21-1.
105. Müller-Steinhagen, H. (2013). *Concentrating solar thermal power*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 371(1996), 20110433.
106. Zarza, E. (2007). *Overview on direct steam generation (DSG) and experience at the Plataforma Solar de Almeria (PSA)*. CIEMAT presentation to the National Renewable Energy Laboratory, [http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/2007/zarza\\_dsg\\_overview.pdf](http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/2007/zarza_dsg_overview.pdf).
107. Burgaleta, J. (2013). *Gemasolar, central termosolar totalmente gestionable*. Torresol Energy.. Presentation, Casa Encendida Madrid.
108. Díaz Villar, P., Peña Capilla, R., & Romón Salinas, C. (2014). *Energía solar térmica y pasiva*. [Madrid]: Ed. Roble.
109. Stekli, J., Irwin, L., & Pitchumani, R. (2013). *Technical challenges and opportunities for concentrating solar power with thermal energy storage*. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 5(2), 021011.
110. Herrmann, U., & Kearney, D. W. (2002). *Survey of thermal energy storage for parabolic trough power plants*. Journal of Solar Energy Engineering, 124(2), 145-152.
111. Liu, M., Tay, N. S., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., & Bruno, F. (2016). *Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 1411-1432.

112. Morin, G., Karl, M., Mertins, M., & Selig, M. (2015). *Molten Salt as a Heat Transfer Fluid in a Linear Fresnel Collector—Commercial Application Backed by Demonstration*. Energy Procedia, 69, 689-698
113. Divya, K. C., & Østergaard, J. (2009). *Battery energy storage technology for power systems—An overview*. Electric Power Systems Research, 79(4), 511-520.
114. Liu, M., Tay, N. S., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., & Bruno, F. (2016). *Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 1411-1432.
115. Cable, R., Blake, K. O. C. D., NREL, H. P., & Potrovitza, N. (2003) *Overview on use of a Molten Salt HTF in a Trough Solar Field*. NREL.
116. Maccari, A. (2006). *Innovative Heat Transfer Concepts in Concentrating Solar Fields*. ENEA Solar Thermodynamic Energy, Brussels.
117. Grogan, D. C. (2013). *Development of Molten-Salt Heat Transfer Fluid Technology for Parabolic Trough Solar Power Plants-Public Final Technical Report (No. DOE/08GO18038)*. Abengoa Solar, LLC.
118. Stekli, J., Irwin, L., & Pitchumani, R. (2013). *Technical challenges and opportunities for concentrating solar power with thermal energy storage*. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 5(2), 021011.
119. Medrano, M., Gil, A., Martorell, I., Potau, X., & Cabeza, L. F. (2010). *State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 56-72.
120. Liu, M., Saman, W., & Bruno, F. (2012). *Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase*

- change thermal storage systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(4), 2118-2132.
121. Medrano, M., Gil, A., Martorell, I., Potau, X., & Cabeza, L. F. (2010). *State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 56-72.
122. Brosseau, D., Kelton, J. W., Ray, D., Edgar, M., Chisman, K., & Emms, B. (2005). *Testing of thermocline filler materials and molten-salt heat transfer fluids for thermal energy storage systems in parabolic trough power plants*. Journal of Solar Energy Engineering, 127(1), 109-116.
123. Flueckiger, S. M., Iverson, B. D., & Garimella, S. V. (2014). *Economic optimization of a concentrating solar power plant with molten-salt thermocline storage*. Journal of Solar Energy Engineering, 136(1), 011015.
124. Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lazaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 31-55.
125. European Academies Science Advisory Council (2011). *Concentrating solar power: its potential contribution to a sustainable energy future*. EASAC policy report.
126. Liu, M., Belusko, M., & Bruno, F. (2016). *High temperature phase change thermal energy storage for concentrating solar power plants*. Energy News, 34(1), 4.
127. Liu, M., Tay, N. S., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., & Bruno, F. (2016). *Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 1411-1432.

128. Kraemer, S. (2014). *Two innovative technologies to cut the cost of energy storage*. CSP Today.
129. Cot-Gores, J., Castell, A., & Cabeza, L. F. (2012). *Thermochemical energy storage and conversion: A-state-of-the-art review of the experimental research under practical conditions*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(7), 5207-5224.
130. Aydin, D., Casey, S. P., & Riffat, S. (2015). *The latest advancements on thermochemical heat storage systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 356-367.
131. Delyannis, E. (2003). *Historic background of desalination and renewable energies*. Solar Energy, 75(5), 357-366.
132. Johansson, T. B. (1993). *Renewable energy: sources for fuels and electricity*. Island press.
133. Liu, M., Tay, N. S., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., & Bruno, F. (2016). *Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 1411-1432.
134. Gobierno de España. (1997). *Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico Español*. Boletín Oficial del Estado, (285)
135. Gobierno de España. (2004). *Real Decreto 436/2004, de 12 de marzo, por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial*. Boletín Oficial del Estado, (75)



136. Gobierno de España. (2007). *Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial*. Boletín Oficial del Estado, (126).
137. Gobierno de España. (2009) *Real Decreto-ley 6/2009, de 30 de abril, por el que se adoptan determinadas medidas en el sector energético y se aprueba el bono social*. Boletín Oficial del Estado, (111).
138. Gobierno de España. (2007). *Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial*. Boletín Oficial del Estado, (126).
139. Gobierno de España. (2012). *Real Decreto-ley 1/2012 por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución en las nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial*. Boletín Oficial del Estado, (24)
140. Ren21, R. (2016). *Global status report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, France.
141. Curran, M. A. (1996). *Environmental life-cycle assessment*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1(3), 179-179.
142. ISO, E. 14040 (2006): *Análisis del ciclo de vida del producto*.
143. SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), (1993). *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice*. Brussels, Belgium.
144. ISO, E. 14040 (2006): *Análisis del ciclo de vida del producto*.

145. Wrisberg, N., Haes, H. A. U. D., Clift, R., Frischknecht, R., Grisel, L., Hofstetter, P., & Stiller, H. (1997). *A strategic research programme for life cycle assessment*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2(2), 71-72.
146. ISO, E. 14040 (2006): *Análisis del ciclo de vida del producto*.
147. Curran, M., (2006) *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*, National Risk Management Research laboratory. Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency.
148. Guinée, J. B. (2002). *Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards*. The international journal of life cycle assessment, 7(5), 311-313
149. Lechón, Y., H. Cabal, C. Lago, C. de la Rúa, R. M. Sáez, and M. Fernández,(2005). *Análisis del ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte. Fase I. Análisis del Ciclo de Vida Comparativo del Etanol de Cereales y de la Gasolina. Energía y Cambio Climático*, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente. Ministerio de Educación y Ciencia. CIEMAT.
150. ISO, E. (2006). 14040: 2006. *Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*.
151. Vrijders, J., & Delem, L. (2010). *Economical and environmental impact of low energy housing renovation*. BBRI, LEHR Res, 1.
152. Curran, M. A., Mann, M., & Norris, G. (2005). *The international workshop on electricity data for life cycle inventories*. Journal of Cleaner Production, 13(8), 853-862.
153. Weidema, B. P. (2003). *Market information in life cycle assessment* (Vol. 863, p. 365). Miljøstyrelsen.

154. Baumann, H., & Tillman, A. M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application*. External organization,
155. Klöpffer, W. (1997). Life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 4(4), 223-228.
156. Duda, M., & Shaw, J. S. (1997). *Life cycle assessment*. Society, 35(1), 38-43.
157. White, A., & Shapiro, K. (1993). *Life cycle assessment*. Environmental science & technology, 27(6), 1016-1017.
158. Usón, A. A., Usón, J. A. A., & Bribián, I. Z. (2010). *Ecodiseño y análisis de ciclo de vida*. Publicaciones Universidad de Zaragoza.
159. De Schryver, A., Humbert, S., & Huijbregts, M. *Different visions on abiotic resource depletion*. Presentation, University Nijmegen, the Netherlands. Accedido el 30 marzo 2016, desde <http://www.lcaforum.ch/portals/0/df40/DF40-05%20Schryver-Resource%20Assessment.pdf>
160. Aranda, A., & Zabalza, I. (2010). *Ecodiseño y análisis de ciclo de vida*. Universidad de Zaragoza.
161. Goedkoop, M., Oele, M., de Schryver, A., Vieira, M., & Hegger, S. (2008). *SimaPro database manual methods library*. PRé Consultants, The Netherlands.
162. Bare, J. (2011). *TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0*. Clean Technologies and Environmental Policy, 13(5), 687-696.
163. Guinée, J. B. (2002). *Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards*. The international journal of life cycle assessment, 7(5), 311-313.

164. Ansems, A. A. M., Eggels, P. G., van Duin, R., & GOEDE, H. D. (1992). *Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guide and Backgrounds*. CML, Leiden University, The Netherlands.
165. Guinée, J. B., & Heijungs, R. (1995). *A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment*. Environmental toxicology and chemistry, 14(5), 917-925.
166. Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Kiehl, J. (2009). *Earth's global energy budget*. Bulletin of the American Meteorological Society, 90(3), 311-323.
167. Inzunza, J. (2000). *Meteorología descriptiva y aplicaciones en Chile*. Universidad de Concepción, Chile.
168. Pinilla Ruiz, C. *Interacción de la radiación con la atmósfera*. Universidad de Jaén. Departamento de Ingeniería Cartográfica. Accedido el 15 de junio de 2016 desde <http://coello.ujaen.es/asignaturas/teledeteccion/tel/archivos/4.pdf>
169. Heijungs, R., Guinée, J. B., Huppes, G., Lankreijer, R. M., Udo de Haes, H. A., Wegener Sleeswijk, A., & De Goede, H. P. (1992). *Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds*. Institute of Environmental Sciences. CML, Leiden openaccess.
170. Houghton, J. T., Callander, B. A., & Varney, S. K. (1992). *The supplementary report to the IPCC scientific assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
171. Jäger, J & H.L. Ferguson (1991) *Climate change: science, impacts and policy*. Cambridge University Press, Cambridge.
172. CHANGE, IPCC Climate. *Mitigation of climate change*. Summary for Policymakers, (2007), p. 10.

173. Fahey, D. W. (2002). *Veinte preguntas y Respuestas sobre la Capa de Ozono*. Evaluación Científica del Agotamiento de Ozono.
174. Chapman, S. (1930). *A theory of upper-atmospheric ozone*. Edward Stanford.
175. Chicón, L. *Ozono atmosférico. Química del ozono*. Accedido el 5 abril 2016, desde <http://www.ambientis.org/ozono.pdf>
176. Wuebbles, D.J. (1988). *Relative effects on stratospheric ozone of halogenated methanes and ethanes of social and industrial interest*. UNEP, Nairobi (Conference 19-10-1988)
177. Nichols, P., Hauschild, M. Z., Potting, J. M. B., & White, P. (1996). *Impact assessment of non toxic pollution in life cycle assessment*. Towards a methodology for life cycle impact assessment.
178. Hauschild, M. Z. (1997). *Environmental assessment of products: volume 2: scientific background* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
179. Wenzel, H., Hauschild, M. Z., & Alting, L. (2000). *Environmental Assessment of Products: Volume 1: Methodology, tools and case studies in product development* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
180. World Meteorological Organization, WMO , (1989) *Scientific assesment of stratospheric ozone*. Volume I; report n.20 WMO/UNEP, Geneva.
181. World Meteorological Organization, WMO , (2014) *Scientific assesment of ozone depletion*. Global Ozone Research and Monitoring Project -Report no. 56. Geneva
182. Van Zelm, R., Huijbregts, M. A., & van de Meent, D. (2009). *USES-LCA 2.0—a global nested multi-media fate, exposure, and effects model*. The international journal of life cycle assessment, 14(3), 282-284.

183. RIVM, V. WVC (1994). *Uniform System for the Evaluation of Substances (USES), version 1.0*. National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM), Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), Ministry of Welfare, Health and Cultural Affairs (WVC). The Hague, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. Distribution, (11144/150).
184. Guinée, J. B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., De Koning, A., & De Bruijn, H. (2001). *Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Parts 1 and 2*. Ministry of housing, spatial planning and environment (VROM) and centre of environmental science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands.
185. Van Zelm, R., Huijbregts, M. A., & van de Meent, D. (2009). *USES-LCA 2.0—a global nested multi-media fate, exposure, and effects model*. The international journal of life cycle assessment, 14(3), 282-284.
186. Guinée, J. B., Heijungs, R., Van Oers, L. F., Wegener Sleeswijk, A., Van de Meent, D., Vermeire, T., & Rikken, M. (1996). *USES-Uniform System for the Evaluation of Substances: Inclusion of Fate in LCA Characterisation of Toxic Releases Applying USES 1.0*. International Journal of Life Cycle Assessment, 1, 133-138.
187. UN-ECE, (1991) *Draft Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution Concerning the Control of Emissions of Volatile Organic Compounds or their Transboundary Fluxes*. UN-ECE Document EB-AIR/R.54.
188. Likens, G. E., Wright, R. F., Galloway, J. N., & Butler, T. J. (1979). *Acid rain*. Sci. Am.;(United States), 241(4).
189. Kelly, J. A. (2006). *An overview of the RAINS Model*. Environmental Protection Agency.

190. Alfaro, P. (2004). *Estudio de los procesos de contaminación difusa y de los riesgos de eutrofización en los embalses de Portodemouros (cuenca del Ulla) y Fervenza (cuenca del Xallas)* (Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela).
191. Heijungs, R., Guinée, J. B., Huppes, G., Lankreijer, R. M., Udo de Haes, H. A., Wegener Sleeswijk, A., & De Goede, H. P. (1992). *Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds (Part 1)*. Institute of Environmental Sciences. CML, Leiden openaccess.
192. Stumm, W., & Morgan, J. J. (1981). *Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. John Wiley.
193. Huijbregts, M. A. J., Breedveld, L., Huppes, G., De Koning, A., Van Oers, L., & Suh, S. (2003). *Normalisation figures for environmental life-cycle assessment: The Netherlands (1997/1998), Western Europe (1995) and the world (1990 and 1995)*. Journal of Cleaner Production, 11(7), 737-748
194. Guinée, J. B. (2001). *LCA—an operational guide to the ISO-standards, part 3 scientific background*. Institute of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden, NL.
195. Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). *Virtual Water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to crop trade*. Value of Water Research Report Series. 11.
196. International Organization for Standardization, ISO, 14046 (2014): *Environmental management-Water footprint-Principles, requirements and guidelines*.
197. Boulay, A. M., Bulle, C., Bayart, J. B., Deschênes, L., & Margni, M. (2011). *Regional characterization of freshwater use in LCA: modeling direct impacts on human health*. Environmental science & technology, 45(20), 8948-8957.

198. Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., & Siebert, S. (2003). *Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability*. Hydrological Sciences Journal, 48(3), 317-337.
199. *The World's Water*. Worldwater.org. Accedido el 9 de marzo de 2016, desde <http://www.worldwater.org/data.html>
200. Kemna, R., Elburg, M. V., Li, W., & Holsteijn, R. V. (2005). *Methodology study eco-design of energy-using products. Final Report*. MEEUP Methodology Report. European Commission DG ENTR. VHK, Delft.
201. *Concentrating Solar Power Projects - Solar Electric Generating Station I*. *Concentrating Solar Power*. NREL. (2009). Nrel.gov. Accedido el 17 Mayo 2016, desde [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=28](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=28)
202. Tortorelli, P. F., Bishop, P. S., & DiStefano, J. R. (1989). *Selection of corrosion-resistant materials for use in molten nitrate salts* (No. ORNL/TM-11162). Oak Ridge National Lab., TN (USA).
203. Bradshaw, R. W., & Clift, W. M. (2010). *Effect of chloride content of molten nitrate salt on corrosion of A516 carbon steel*. Sandia report.
204. Fernandez, A. G., Lasanta, M. I., & Perez, F. J. (2012). *Molten salt corrosion of stainless steels and low-Cr steel in CSP plants*. Oxidation of metals, 78(5-6), 329-348.
205. Fernández Díaz-Carralero, Á. G. (2013). *Estudios físico-químicos y de corrosión a elevada temperatura para el diseño de nuevos fluidos almacenadores de energía en centrales solares de concentración*. Universidad Complutense de Madrid.
206. Handbook, A. S. M. (1990). *Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys*. ASM international, 1, 140-194.



207. Pacheco, J. E., Showalter, S. K., & Kolb, W. J. (2002). *Development of a molten-salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants*. Journal of solar energy engineering, 124(2), 153-159.
208. Barón, Y. S., Navas, G., & Ruiz, A. (2010). *Mecanismo de oxidación de un acero 1, 25Cr-0, 5Mo Wt en aire a 600°C*. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 40-45.
209. Handbook, A. S. M. (1990). *Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys*. ASM international, 1, 140-194.
210. Handbook, A. S. M. (1990). *Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys*. ASM international, 1, 140-194.
211. García Garrido, S. (2010). *Degradación del Fluido Térmico*. RENOVETEC, formación técnica especializada. Accedido el 18 de abril 2016, desde <http://www.renovetec.com/articulos/degradadofluidotermico.html>
212. Fernández Díaz-Carralero, Á. G. (2013). *Estudios físico-químicos y de corrosión a elevada temperatura para el diseño de nuevos fluidos almacenadores de energía en centrales solares de concentración*. Universidad Complutense de Madrid.
213. Bauer, T., Pflieger, N., Laing, D., Steinmann, W., Eck, M., & Kaesche, S. (2013). *High-temperature molten salts for solar power application*. Molten Salts Chemistry, 415-438.
214. *Concentrating Solar Power Projects – Archimede*. Concentrating Solar Power. NREL. (2012). *Nrel.gov*. Accedido el 18 de mayo de 2016, desde [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=19](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=19)
215. Iglesias Fernández, D. (2012). *Estudio numérico del flujo de sales fundidas en un receptor central de torre mediante Fluent*. Universidad Carlos III de Madrid.

216. Haubenreich, P. N., & Engel, J. R. (1970). *Experience with the molten-salt reactor experiment*. Nuclear Technology, 8(2), 118-136.
217. Briant, R. C., & Weinberg, A. M. (1957). *Molten fluorides as power reactor fuels*. Nuclear science and engineering, 2(6), 797-803.
218. Silverman, M. D., & Engel, J. R. (1977). *Survey of technology for storage of thermal energy in heat transfer salt* (No. ORNL/TM-5682). Oak Ridge National Lab., Tenn.(USA).
219. Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lazaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 31-55.
220. Slocum, A. H., Codd, D. S., Buongiorno, J., Forsberg, C., McKrell, T., Nave, J. C., & Rojas, F. (2011). *Concentrated solar power on demand*. Solar Energy, 85(7), 1519-1529.
221. Lacy, D. E., Coles-Hamilton, C., & Juhasz, A. (1987). *Selection of high temperature thermal energy storage materials for advanced solar dynamic space power systems*. NASA.
222. Misra, A. K., & Whittenberger, J. D. (1987). *Fluoride salts and container materials for thermal energy storage applications in the temperature range 973 to 1400 K*. NASA.
223. Denholm, P., King, J. C., Kutcher, C. F., & Wilson, P. P. (2012). *Decarbonizing the electric sector: Combining renewable and nuclear energy using thermal storage*. Energy Policy, 44, 301-311.

224. Kearney, D., Herrmann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., & Price, H. (2003). *Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field*. Journal of solar energy engineering, 125(2), 170-176.
225. Siegel, N. P. (2012). *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ*, 1, 119.
226. Gomez, J. C. (2011). *Change Materials (PCM) Candidates for Thermal Energy Storage (TES) Applications*. Contract, 303, 275-3000.
227. Li, Y., Zhang, Y., Li, M., & Zhang, D. (2013). *Testing method of phase change temperature and heat of inorganic high temperature phase change materials*. Experimental thermal and fluid science, 44, 697-707.
228. Serrano-López, R., Fradera, J., & Cuesta-López, S. (2013). *Molten salts database for energy applications*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 73, 87-102.
229. Kearney, D., Herrmann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., & Price, H. (2003). *Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field*. Journal of solar energy engineering, 125(2), 170-176.
230. Bauer, T., Laing, D., & Tamme, R. (2011). *Recent progress in alkali nitrate/nitrite developments for solar thermal power applications*. Molten Salts Chemistry and Technology, 543-553.
231. Laue, W. et al. (1998) *Nitrates and Nitrites*. Ullmann's Encycl. of Industrial Chemistry, 6 Edition.
232. Rogers, D. J., & Janz, G. J. (1982). *Melting-crystallization and premelting properties of sodium nitrate-potassium nitrate. Enthalpies and heat capacities*. Journal of Chemical and Engineering Data, 27(4), 424-428.

233. Berg, R. W., & Kerridge, D. H. (2004). *The NaNO<sub>3</sub>/KNO<sub>3</sub> system: the position of the solidus and sub-solidus*. Dalton Transactions, (15), 2224-2229.
234. Zhang, X., Tian, J., Xu, K., & Gao, Y. (2003). *Thermodynamic evaluation of phase equilibria in NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub> system*. Journal of phase equilibria, 24(5), 441-446.
235. Bauer, T., Laing, D., & Tamme, R. (2011). *Overview of PCMs for concentrated solar power in the temperature range 200 to 350 C*. Advances in Science and Technology Vol. 74, pp. 272-277.
236. Kearney, D., Herrmann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., & Price, H. (2003). *Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field*. Journal of solar energy engineering, 125(2), 170-176.
237. Kearney, D., Herrmann, U., Nava, P., Kelly, B., Mahoney, R., Pacheco, J., & Price, H. (2003). *Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field*. Journal of solar energy engineering, 125(2), 170-176.
238. Kirst, W. E., Nagle, W. M., & Castner, J. B. (1940). *A new heat transfer medium for high temperatures*. Transactions of the American Institute of Chemical Engineers, 36, 371-394.
239. Alexander Jr, J., & Hindin, S. G. (1947). *Phase relations in heat transfer salt systems*. Industrial & Engineering Chemistry, 39(8), 1044-1049.
240. Berul, S. I., & Bergman, A. G. (1954). *Triple Mutual System of Sodium and Potassium Nitrates and Nitrites (in Russian)*, Izv. Sek. Fiz-Khim. Anal. Inst. Obshch. Neorg. Khim. Akad. Nauk SSSR, 218-235.
241. Sakai, K. (1954). *A Microphotographic Research on Salt System: NaNO<sub>2</sub>-KNO<sub>3</sub>*. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 27(7), 463-465.

242. Voskresenskaya, N. K. (1961). *Handbook of solid-liquid equilibria in systems of anhydrous inorganic salts, Vol 1 and 2*. Israel Program for Scientific Translations.
243. Silverman, M. D., & Engel, J. R. (1977). *Survey of technology for storage of thermal energy in heat transfer salt* (No. ORNL/TM-5682). Oak Ridge National Lab., Tenn.(USA).
244. Janz, G. J., & Truong, G. N. (1983). *Melting and premelting properties of the potassium nitrate-sodium nitrite-sodium nitrate eutectic system*. Journal of chemical and engineering data, 28(2), 201-202.
245. U.S. Patent (1945). *Treatment of heat transfer salts*. No 2,375,759, 15 Mayo 1945.
246. Picard, G., Flament, T., Tremillon, B., Saint-Paul, P., & Spiteri, P. (1985). *U.S. Patent No. 4,559,993*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
247. Singh, I. B., & Sen, U. (1993). *The effect of NaCl addition on the corrosion of mild steel in NaNO<sub>3</sub> melt*. Corrosion science, 34(10), 1733-1742.
248. Yan, B., & Lei, F. (2010). *Molten salt synthesis, characterization and luminescence of ZnWO<sub>4</sub>: Eu<sup>3+</sup> nanophosphors*. Journal of Alloys and Compounds, 507(2), 460-464.
249. Fernández, A. G., Cortes, M., Fuentealba, E., & Pérez, F. J. (2015). *Corrosion properties of a ternary nitrate/nitrite molten salt in concentrated solar technology*. Renewable Energy, 80, 177-183.
250. Goods, S. H., & Bradshaw, R. W. (2004). *Corrosion of stainless steels and carbon steel by molten mixtures of commercial nitrate salts*. Journal of materials engineering and performance, 13(1), 78-87.

251. Prairie, M. R., Dunkin, S. R., Chavez, J. M., Bradshaw, R. W., & Goods, S. H. (1994). *Isothermal corrosion testing of steels in molten nitrate salts*. SAND Series Albuquerque, N.M., SAND 93-2334 C.
252. Bradshaw, R. W., & Goods, S. H. (2001). *Corrosion resistance of stainless steels during thermal cycling in alkali nitrate molten salts (No. SAND-2001-8518)*. Sandia Nat. Lab..
253. Wilkes, J. S. (2002). *A short history of ionic liquids—from molten salts to neoteric solvents*. *Green Chemistry*, 4(2), 73-80.
254. Vignarooban, K., Xu, X., Arvay, A., Hsu, K., & Kannan, A. M. (2015). *Heat transfer fluids for concentrating solar power systems—A review*. *Applied Energy*, 146, 383-396.
255. Fernandez, A. G., Ushak, S., Galleguillos, H., & Pérez, F. J. (2014). *Development of new molten salts with  $\text{LiNO}_3$  and  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  for energy storage in CSP plants*. *Applied Energy*, 119, 131-140.
256. Fernández, A. G., Galleguillos, H., & Pérez, F. J. (2014). *Corrosion ability of a novel heat transfer fluid for energy storage in CSP plants*. *Oxidation of Metals*, 82(5-6), 331-345.
257. Fernández, A. G., Ushak, S., Galleguillos, H., & Pérez, F. J. (2015). *Thermal characterisation of an innovative quaternary molten nitrate mixture for energy storage in CSP plants*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 132, 172-177.
258. Wang, T., Mantha, D., & Reddy, R. G. (2013). *Thermodynamic properties of  $\text{LiNO}_3$ – $\text{NaNO}_3$ – $\text{KNO}_3$ – $2\text{KNO}_3$ · $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  system*. *Thermochimica Acta*, 551, 92-98.

259. Peng, Q., Yang, X., Ding, J., Wei, X., & Yang, J. (2014). *Thermodynamic performance of the NaNO<sub>3</sub>–NaCl–NaNO<sub>2</sub> ternary system*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 115(2), 1753-1758.
260. Paul, T. C., Morshed, A. K. M. M., Fox, E. B., Visser, A. E., Bridges, N. J., & Khan, J. A. (2014). *Thermal performance of ionic liquids for solar thermal applications*. Experimental Thermal and Fluid Science, 59, 88-95.
261. Blake, D. M., Moens, L., Hale, M. J., Price, H., Kearney, D., & Herrmann, U. (2002, September). *New heat transfer and storage fluids for parabolic trough solar thermal electric plants*. In Conference new heat transfer and storage fluids for parabolic trough solar thermal electric plants.
262. Moens, L., Blake, D. M., Rudnicki, D. L., & Hale, M. J. (2003). *Advanced thermal storage fluids for solar parabolic trough systems*. Journal of solar energy engineering, 125(1), 112-116.
263. Dudda, B., & Shin, D. (2013). *Effect of nanoparticle dispersion on specific heat capacity of a binary nitrate salt eutectic for concentrated solar power applications*. International Journal of Thermal Sciences, 69, 37-42.
264. Dawson D, Bradshaw B, Goods S. (2002). *Final test and evaluation results from the Solar Two project (No. SAND2002-0120)*. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (US); Sandia National Labs., Livermore, CA (US).
265. Fernández, A. G., Rey, A., Lasanta, I., Mato, S., Brady, M. P., & Pérez, F. J. (2014). *Corrosion of alumina-forming austenitic steel in molten nitrate salts by gravimetric analysis and impedance spectroscopy*. Materials and Corrosion, 65(3), 267-275.

266. Yan, Y. F., Xu, X. Q., Zhou, D. Q., Wang, H., Wu, Y., Liu, X. J., & Lu, Z. P. (2013). *Hot corrosion behaviour and its mechanism of a new alumina-forming austenitic stainless steel in molten sodium sulphate*. Corrosion Science, 77, 202-209.
267. McConohy, G., & Kruizenga, A. (2014). *Molten nitrate salts at 600 and 680° C: Thermophysical property changes and corrosion of high-temperature nickel alloys*. Solar Energy, 103, 242-252.
268. Chung, S. J., Park, J. H., Li, D., Ida, J. I., Kumakiri, I., & Lin, J. Y. (2005). *Dual-phase metal-carbonate membrane for high-temperature carbon dioxide separation*. Industrial & engineering chemistry research, 44(21), 7999-8006.
269. Weidema, B. P., Bauer, C., Hischer, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., & Wernet, G. (2013). *The ecoinvent database: Overview and methodology, Data quality guideline for the ecoinvent database version 3*. Ecoinvent.
270. Classen, M., Althaus, H. J., Blaser, S., Tuchschrnid, M., Jungbluth, N., Doka, G., & Scharnhorst, W. (2009). *Life cycle inventories of metals*. Final report ecoinvent data v2, 1(10).
271. Blair, N., Dobos, A., Freeman, J., Neises, T., Wagner, M., Ferguson, T., & Janzou, S. (2014). *System advisor model, sam 2014.1. 14: General description*. NREL Rep. No. TP-6A20-61019, Natl. Renew. Energy Lab. Golden, CO, 13.
272. *International Weather for Energy Calculations*, ashrae.org. (2016). Ashrae.org. Accedido el 6 abril 2016, desde <https://www.ashrae.org/resources-publications/bookstore/international-weather-for-energy-calculations>
273. Millennium, S. (2008). *The parabolic trough power plants Andasol 1 to 3*. Tech. Solar Millennium AG.



274. Varro, L., & Ha, J. (2015). *Projected Costs of Generating Electricity*. International Energy Agency, IEA.
275. Herrmann, U., Kelly, B., & Price, H. (2004). *Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants*. *Energy*, 29(5-6), 883-893.
276. Hinkley, J., Curtin, B., Hayward, J., Wonhas, A., Boyd, R., Grima, C., & Mikhail, A. (2011). *Concentrating solar power—drivers and opportunities for cost-competitive electricity*. Clayton South: CSIRO.
277. Serrano-López, R., Fradera, J., & Cuesta-López, S. (2013). *Molten salts database for energy applications*. *Chemical Engineering And Processing: Process Intensification*, 73, 87-102.
278. Solutia. (2016). *Therminol 66. High performance. Highly stable. Heat Transfer Fluid*. Therminol.org
279. D. A. Nissen, (1982) *Journal of Chemical & Engineering*, Data 27 269–273.
280. NREL, (2016). *S.A.M. (System Advisor Model)*. National Renewable Energy Laboratory. EEUU.
281. Viebahn, P., Kronshage, S., & Lechon, Y. (2008). *Deliverable n 12.2-RS Ia" Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants*. New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS) Integrated Project, EU 6th Framework Programme, Brussels.
282. Standard, A. P. I. (2007). *650, Welded steel tanks for oil storage*. American Petroleum Institute.
283. Dominguez, R., Baringo, L., & Conejo, A. J. (2012). *Optimal offering strategy for a concentrating solar power plant*. *Applied Energy*, 98, 316-325.

284. Pihl, E., Kushnir, D., Sandén, B., & Johnsson, F. (2012). *Material constraints for concentrating solar thermal power*. Energy, 44(1), 944-954.
285. Standard, A. P. I. (2007). 650, *Welded steel tanks for oil storage*. American Petroleum Institute.
286. Cable, R., Blake, K. O. C. D., NREL, H. P., & Potrovitza, N. (2003) *Overview on use of a Molten Salt HTF in a Trough Solar Field*. NREL.
287. García Garrido, S., (2015). *Construcción y puesta en marcha de centrales termosolares CCP*. RENOVETEC.

